



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación
Departamento de Ingeniería Eléctrica

ANÁLISIS DE LA INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA POR EFECTO CORONA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ALTA TENSIÓN EN C.A.

TESIS

Que para obtener el grado de:
Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Eléctrica

Presenta:

Carlos Tejada Martínez



México D. F., Junio 2008



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO**

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 17:00 horas del día 20 del mes de Mayo del 2008 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la E.S.I.M.E. ZAC para examinar la tesis de grado titulada:

“ANÁLISIS DE LA INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA POR EFECTO CORONA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ALTA TENSIÓN EN C.A.”

Presentada por el alumno:

TEJADA

Apellido paterno

MARTÍNEZ

materno

CARLOS

nombre(s)

Con registro:

B	0	6	1	3	9	6
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director de tesis

DR. PABLO GÓMEZ ZAMORANO

Presidente

DR. DANIEL OLGUIN SALINAS

Segundo Vocal

DR. FERMÍN PASCUAL ESPINO CORTÉS

Tercer Vocal

M. EN C. GILBERTO ENRIQUEZ HARPER

Secretario

DR. RICARDO OCTAVIO MOTA PALOMINO

Suplente

M. EN C. TOMÁS IGNACIO ASAIÑ OLIVARES

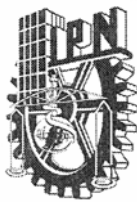
EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. JAIME ROBLES GARCÍA



L. P. N.
SECCION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACION





INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
COORDINACION GENERAL DE POSGRADOS E INVESTIGACION

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, Distrito Federal, el día 05 del mes de Junio del año 2008, el que suscribe **Ing. Carlos Tejada Martínez** alumno del Programa de Maestría en Ciencias con especialidad en Ingeniería Eléctrica con número de registro **B061396**, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor intelectual del presente Trabajo de Tesis bajo la dirección del **Dr. Pablo Gómez Zamorano** y **Dr. Fermín Pascual Espino Cortés** y cede los derechos del trabajo intitulado: **Análisis de la Interferencia Electromagnética por Efecto Corona en Líneas de Transmisión de Alta Tensión en C.A.**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, graficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido de las siguientes direcciones: ctejadam303@yahoo.com.mx; pablo.gomez.78@gmail.com; fespinoc@ipn.mx

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Carlos Tejada Martínez
Nombre y firma





RESUMEN

Debido a la utilización de tensiones de transmisión cada vez mayores, es común que se presente en las líneas de transmisión un fenómeno conocido como efecto corona, teniéndose como consecuencias principales: pérdidas de potencia, ruido audible, distorsión de ondas viajeras e interferencia electromagnética. Las emisiones electromagnéticas debidas a corona se presentan en un amplio rango de frecuencias y pueden interferir con el funcionamiento normal de algunos dispositivos electromagnéticos localizados en la cercanía de las líneas.

En este trabajo se presenta un método para calcular los niveles de radiointerferencia (RI) que generan las líneas de transmisión de alta tensión con efecto corona. Dicho método está basado en el método de Gary y la teoría de descomposición modal, considerando también el efecto “skin” en los conductores y el retorno por tierra. El método se implementa en un programa de cómputo y se presentan casos de aplicación para líneas trifásicas comparando los resultados con mediciones publicadas previamente por otros autores, mostrando que las mejoras efectuadas al método de Gary conducen a mejores predicciones de radiointerferencia.

Además, se evalúan algunas técnicas simples de atenuación de RI, en particular la variación del número de conductores por fase y del espaciamiento entre subconductores en haz. Con lo anterior se logra aumentar el radio equivalente del haz y consecuentemente disminuir los perfiles de radiointerferencia.





ABSTRACT

Due to the continuous increase of transmission voltage levels, it is common to observe in the transmission lines a phenomenon known as corona, which in consequence can produce power losses, audible noise, distortion of traveling waves and electromagnetic interference. Electromagnetic emissions due to corona are presented over a wide frequency range and can interfere with the regular operation of some electromagnetic equipment located nearby the lines.

In this work, a method to compute radiointerference (RI) levels generated from corona on transmission lines is presented. This method is based on Gary's method and modal decomposition, considering also the skin effect in conductors and in ground plane. The method is implemented in a computer program and several application examples for 3-phase lines are presented, comparing the results with measurements published previously by other authors, showing that the improvements added to Gary's method lead to better radiointerference prediction.

Also, some simple techniques for the attenuation of RI are evaluated, in particular the variation in the number of phase conductors and the spacing between conductors in a bundle, so that the equivalent bundle radius is increased and the radiointerference levels are reduced.





DEDICATORIAS

Con cariño para mis Padres:

Carmen y Margarito.

Y a mis hermanos:

Verónica, Hugo y Daniel.





AGRADECIMIENTOS

Cada vez que damos un paso más en nuestras vidas, debemos recordar que existen personas a nuestro alrededor quienes de alguna u otra manera nos han brindado de su apoyo para llegar a donde estamos. Por esta razón, quiero expresar mi gratitud a:

A Dios por brindarme la oportunidad de dar un paso más en mi vida.

A mis padres por todo su gran apoyo, ejemplo de trabajo y honradez.

Al Dr. Pablo Gómez por su asesoría, paciencia y dedicación en el desarrollo de esta tesis.

Al Dr. Fermín Espino por sus orientaciones en este trabajo y colaboración en las pruebas de laboratorio.

A todos mis amigos y compañeros de la SEPI.

Y finalmente, al Instituto Politécnico Nacional por abrirme sus puertas y así poder desarrollarme profesionalmente en una de las mejores escuelas de Ingeniería en México.

Mil gracias a todos

Carlos Tejada Martínez





CONTENIDO

	Página
Resumen	i
Abstract.	ii
Dedicatorias.	iii
Agradecimientos.	iv
Contenido.	v
Índice de Figuras.	viii
Índice de Tablas.	xi
Simbología.	xii
CAPÍTULO I Introducción.	1
1.1 Generalidades.	1
1.2 Planteamiento del Problema.	2
1.3 Objetivos.	3
1.4 Justificación.	3
1.5 Estado del Arte.	4
1.6 Limitaciones y Alcances del Trabajo.	8
1.7 Aportaciones de la Tesis	9
1.8 Estructura de la Tesis.	10
CAPÍTULO II El Concepto de Efecto Corona en Líneas de Transmisión.	12
2.1 Introducción.	12
2.2 Proceso Básico de Ionización.	13
2.3 Medición de la Corriente Corona	16
2.4 Gradiente de Incepción de Corona.	18
2.5 Pérdidas por Corona.	20
2.5.1 Cálculo de Pérdidas por Corona.	20





2.6 Ruido Audible.	22
2.6.1 Cálculo de Ruido Audible.	23
2.7 Radiointerferencia.	23
2.8 Distorsión en la Propagación de Ondas.	24
2.8.1 Representación de Corona para análisis de propagación de ondas.	24
CAPÍTULO III Radiointerferencia por Corona en Líneas de Transmisión.	27
3.1 Introducción.	27
3.2 Descripción Física de la RI debida al Efecto Corona.	28
3.3 El Concepto de Función de Excitación.	31
3.4 Estimación de la RI.	33
3.4.1 Condiciones climáticas.	34
3.4.2 Espectro de Frecuencias	34
3.4.3 Geometría del conductor.	35
3.4.4 Perfil lateral de la Radiointerferencia.	35
3.5 Medición de la RI.	35
3.5.1 El Medidor de Radiointerferencia.	36
3.5.2 Sistemas de Antena.	37
3.6 Interferencia Electromagnética en Corriente Directa.	38
CAPÍTULO IV Método de Predicción de Perfiles de Radiointerferencia.	40
4.1 Introducción.	40
4.2 Análisis de la Propagación de Corona y Cálculo de RI.	40
4.2.1 Línea Monofásica.	41
4.2.2 Línea Multiconductora.	43
4.3 Casos de Aplicación.	50
4.3.1 Líneas en Configuración Horizontal y Triangular.	51
4.3.2 Líneas en Configuración Vertical.	56
4.4 Comparación con resultados experimentales.	60
4.5 Análisis de Resultados.	62





CAPÍTULO V Evaluación de Técnicas de Atenuación de RI.	64
5.1 Introducción.	64
5.2 Selección de Conductores.	65
5.3 Conductores en Haz	66
5.4 Diseño de Conductores con respecto al esfuerzo causado por la alta tensión.	68
5.4.1 Diseño con respecto a los parámetros eléctricos.	68
5.4.2 Diseño con respecto al gradiente en la superficie de los conductores y Efecto Corona.	70
5.5 Distribución del Campo Eléctrico en la Superficie de los Conductores.	71
5.6 Aplicación de criterios para la atenuación de niveles de RI.	76
5.6.1 Variación en el espaciamiento entre subconductores.	77
5.6.2 Variación en el número de subconductores.	79
5.7 Análisis de Resultados.	82
CAPÍTULO VI Conclusiones.	84
6.1 Conclusiones Generales.	84
6.2 Aportaciones de la Tesis.	85
6.3 Recomendaciones para Trabajos Futuros	86
Referencias	88
Apéndice A: Definición de los Parámetros por unidad de longitud de la Línea de Transmisión.	94
Apéndice B: Artículos Publicados.	102





ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Conductor con efecto corona.	12
Figura 2.2	Avalancha de electrones de un electrodo negativo.	15
Figura 2.3	Arreglo experimental para la medición de corriente corona.	17
Figura 2.4	Pulso de corriente corona medida en un arreglo coaxial.	17
Figura 2.5	Cilindros concéntricos.	19
Figura 2.6	Conductores paralelos.	19
Figura 2.7	Conductor paralelo a un plano.	19
Figura 2.8	Curva $q - V$ (carga - voltaje).	25
Figura 3.1	Pulsos de corriente de corona positivo y negativo.	30
Figura 3.2	Diagrama a bloques de un medidor de radiointerferencia.	37
Figura 4.1	Circuito por unidad de longitud de una línea aérea con inyecciones de corriente corona.	41
Figura 4.2	Diagrama a bloques del método de predicción de perfiles de RI.	47
Figura 4.3	Características geométricas de la línea trifásica de 380 kV.	52
Figura 4.4	Perfil de RI total de la línea trifásica de 380 kV.	52
Figura 4.5	Características geométricas de la línea trifásica de 400 kV.	53
Figura 4.6	Perfil de RI total de la línea trifásica de 400 kV.	54
Figura 4.7	Características geométricas de la línea trifásica de 750 kV.	55
Figura 4.8	Perfil de RI total de la línea trifásica de 750 kV.	55
Figura 4.9	Características geométricas de la línea trifásica de 500 kV.	56
Figura 4.10	Perfil de RI total de la línea trifásica de 500 kV.	57
Figura 4.11	Características geométricas de la línea trifásica de 230 kV.	58
Figura 4.12	Perfil de RI total de la línea trifásica de 230 kV.	58
Figura 4.13	Características geométricas de la línea trifásica de 345 kV.	59





Figura 4.14	Perfil Lateral de RI total de la línea trifásica de 345 kV.	59
Figura 4.15	Comparación de resultados con mediciones.	61
Figura 5.1	Haz de seis subconductores.	67
Figura 5.2	Dimensiones típicas de una torre de suspensión de 400 kV, circuito doble.	69
Figura 5.3	Líneas equipotenciales alrededor de un conductor energizado con 400 kV.	71
Figura 5.4	Intensidad de campo eléctrico en un conductor.	72
Figura 5.5	Distribución del campo eléctrico alrededor de un conductor.	72
Figura 5.6	Líneas equipotenciales alrededor de un haz de 2 conductores energizados con 400 kV.	73
Figura 5.7	Intensidad de campo eléctrico en un haz de 2 conductores.	74
Figura 5.8	Distribución del campo eléctrico alrededor de un haz de 2 conductores.	74
Figura 5.9	Líneas equipotenciales alrededor de un haz de 4 conductores energizados con 400 kV.	75
Figura 5.10	Intensidad de campo eléctrico en un haz de 4 conductores.	75
Figura 5.11	Distribución del campo eléctrico alrededor de un haz de 4 conductores.	76
Figura 5.12	Perfil de RI de una línea de 400 kV para diferentes espaciamientos entre subconductores.	77
Figura 5.13	Niveles de RI en función del espaciamiento entre subconductores de haz.	79
Figura 5.14	Perfil de RI de una línea de 400 kV en función del número de subconductores por haz.	80
Figura 5.15	Perfil de RI de una línea de 345 kV en función del número de subconductores por haz.	81
Figura 5.16	Perfil de RI de una línea de 500 kV en función del número de subconductores por haz.	82
Figura A.1	Método de las imágenes, caso monofásico.	94





Figura A.2	Método de las imágenes complejas, caso monofásico.	95
Figura A.3	Efecto skin en un conductor.	97
Figura A.4	Método de imágenes caso multiconductor.	99
Figura A.5	Método de imágenes compleja, caso multiconductor.	99





ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Parámetros típicos de los pulsos corona positivo y negativo.	29
Tabla 3.2	Fórmulas empíricas para el cálculo de la función de excitación.	33
Tabla 4.1	Constantes de atenuación para el ejemplo 1.	53
Tabla 4.2	Constantes de atenuación para el ejemplo 2.	54
Tabla 4.3	Constantes de atenuación para el ejemplo 3.	55
Tabla 4.4	Constantes de atenuación para el ejemplo 4.	57
Tabla 4.5	Constantes de atenuación para el ejemplo 5.	58
Tabla 4.6	Constantes de atenuación para el ejemplo 6.	60
Tabla 4.7	Datos geométricos de las líneas de estudio.	60
Tabla 4.8	Gradientes de campo eléctrico y parámetros utilizados en las mediciones.	61
Tabla 4.9	Comparación entre mediciones y valores calculados de RI.	61
Tabla 5.1	Parámetros Eléctricos de una Línea de Transmisión de 400 kV, circuito doble, con diferentes números de subconductores.	70
Tabla 5.2	Comparaciones de Niveles de RI variando el espaciamiento entre subconductores para diferentes líneas a una distancia de 50 m.	78
Tabla 5.3	Niveles de RI de una Línea de Transmisión de 400 kV a 50 m de la fase central, con diferentes números de subconductores.	80
Tabla 5.4	Datos y Niveles de RI a 50 m de la fase central, con diferentes números de subconductores.	81





SIMBOLOGÍA

α	Constante de atenuación.
α_1	Primer coeficiente de ionización de Townsend.
α_m	Matriz de constantes de atenuación modal.
μ_e	Permeabilidad del terreno.
A	Átomo neutro.
A^+	Ión positivo.
AF	Factor de antena.
AIEE	American Institute of Electrical Engineers.
AM	Amplitud Modulada.
ANSI	American National Standards Institute.
AT	Alta Tensión.
BPA	Boneville Power Administration.
C	Capacitancia.
\mathbf{C}	Matriz de capacitancias.
CA	Corriente Alterna.
C_c	Capacitancia de corona.
CD	Corriente Directa.
C_g	Capacitancia geométrica.
CIGRÉ	International Council on Large Electric Systems.
CISPR	Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques.
CP	Cuasi-pico.
d	Distancia del gap.
D_{Li}	Distancia entre conductor y punto de referencia.
d_r	Distancia radial.





e	Electrón.
E	Campo de radiointerferencia.
E_0	Rigidez dieléctrica del aire.
E_1	Gradiente en la superficie del conductor.
E_c	Gradiente crítico.
EPRI	Electric Power Research Institute.
E_y	Intensidad de campo eléctrico.
f	Frecuencia.
F	Factor determinado experimentalmente.
FM	Frecuencia Modulada.
G	Conductancia.
g_{avg}	Gradiente eléctrico promedio.
$g_{máx}$	Gradiente eléctrico máximo.
h	Altura del conductor.
HVDC	High Voltage Direct Current.
H_x	Campo magnético.
I	Corriente.
\mathbf{I}	Vector de corrientes.
I_0	Corriente inicial.
IEC	International Electrotechnical Commission.
\mathbf{I}_m	Vector de corrientes modales.
i_p	Amplitud de corriente.
IREQ	Hydro-Québec's Research Institute.
J	Corriente inducida de corona.
\mathbf{J}	Vector de corrientes corona.
\mathbf{J}_m	Vector de corrientes corona modales.
K	Constante empírica.
L	Inductancia.





m	Factor de irregularidad.
M	Matriz de vectores propios de ZY
n	Número de fases.
N	Matriz de vectores propios de YZ
n_c	Número de conductores por haz.
NEMA	National Electrical Manufacturers Association.
NP	Nivel de ruido audible total.
NP_{Ai}	Potencial de ruido audible del conductor i
p	Presión del aire.
P	Profundidad de penetración.
P	Matriz de coeficientes de potencial de Maxwell.
p_0	Presión inicial.
P_{cor}	Pérdidas por corona.
PLC	Power Line Communication.
q	Carga.
q	Vector de cargas.
r	Radio del conductor.
R	Resistencia.
R_{eq}	Radio equivalente.
RI	Radiointerferencia.
R_i	Radio de haz.
RIV	Radio Interference Voltage.
s	Separación entre subconductores.
SIL	Surge Impedance Load.
t	Temperatura.
t_0	Temperatura inicial.
TEM	Transversal Electromagnético.
TV	Televisión.





TVI	Transmisión de señales de video.
V	Tensión.
\mathbf{V}	Vector de tensiones.
V_c	Tensión de inyección.
V_L	Lectura de medición.
V_r	Velocidad radial de la carga espacial.
x	Distancia del punto de medición.
Y	Admitancia en derivación.
\mathbf{Y}	Matriz de admitancias.
Z	Impedancia serie.
\mathbf{Z}	Matriz de impedancias.
Z_0	Impedancia de onda.
\mathbf{Z}_c	Matriz de impedancias internas de los conductores.
\mathbf{Z}_G	Matriz de impedancias geométricas.
\mathbf{Z}_t	Matriz de impedancias debidas al retorno por tierra.
β	Constante de fase.
Γ	Función de excitación.
γ	Constante de propagación.
Γ_0	Función de excitación unitaria.
δ	Densidad relativa del aire.
Δz	Elemento diferencial de longitud.
ϵ_0	Permitividad del vacío.
λ_I	Matriz de valores propios de \mathbf{YZ}
λ_V	Matriz de valores propios de \mathbf{ZY}
ρ_e	Resistividad del terreno.
φ	Carga generada por corona.
Ψ	Matriz de constantes de propagación modal.
Ψ	Flujo magnético.





CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES.

Los sistemas eléctricos de potencia modernos han sido el resultado de más de 100 años de desarrollo el cual envuelve aspectos técnicos y económicos. La transmisión de grandes cantidades de potencia a grandes distancias juega un papel muy importante en este avance [1], [2].

Desde que a comienzos del siglo pasado se construyó el primer sistema de transmisión de energía, de aproximadamente 100 kV, la tensión de transmisión ha aumentado considerablemente. Para 1965 entraba en servicio el sistema canadiense de 735 kV, y en la actualidad varios países, entre ellos Estados Unidos, Brasil y Venezuela en el continente Americano, cuentan con sistemas de transmisión de energía de corriente alterna de 800 kV, aunque en muchas partes del mundo ya existen sistemas de transmisión de 1200 kV [1]. En México, los niveles de tensión utilizados en la red de transmisión son de 400, 230 y 161 kV. Al finalizar marzo del año 2008, esta red alcanzó una longitud de 48, 635 km [41].

La tendencia de utilizar tensiones de transmisión cada vez mayores radica en las considerables ventajas que se obtienen al transportar energía eléctrica a grandes distancias, ya que se logran minimizar las pérdidas y maximizar la potencia transportada.

Aumentar el nivel de tensión de transmisión conlleva a una disminución de la intensidad de corriente que circula por la línea para transportar la misma potencia. Por lo tanto, las pérdidas por calentamiento de los conductores y por efectos electromagnéticos también se reducen. Además, una mayor corriente requiere de conductores de mayor sección





transversal, y en consecuencia, con un mayor peso por unidad de longitud. Al utilizar niveles de alta tensión, se pueden utilizar conductores de menor diámetro, y de esta manera reducir el costo de transmisión [3], [4].

Sin duda, la transmisión a alta tensión conlleva una serie de ventajas, pero también es necesario realizar consideraciones más detalladas en los niveles de aislamiento y dispositivos de protección. Por otro lado, se debe tener presente la aparición de fenómenos físicos característicos de la alta tensión como lo es el efecto corona [1], [2].

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Actualmente, los sistemas de comunicación digitales son ampliamente utilizados, y conforme se logran mayores avances en este campo, la transmisión de este tipo de señales se realiza cada vez a mayores frecuencias.

Debido a la utilización de niveles de tensión cada vez mayores en las líneas de transmisión, la probabilidad de que se presente el efecto corona es muy alta [3]. Dicho fenómeno tiene como consecuencias principales pérdidas de potencia, ruido audible, distorsión de ondas y, debido a que se presentan oscilaciones electromagnéticas de alta frecuencia, también se generan campos de radiointerferencia en la vecindad de la línea. Si la frecuencia de la emisión electromagnética debida a corona coincide con la frecuencia de alguna señal de comunicación cercana a la línea, esta última puede ser distorsionada. Para mitigar este efecto, las líneas de comunicación deben instalarse a distancias seguras de la línea de potencia, razón por la cual es necesario estimar los niveles de radiointerferencia a diferentes distancias de ella [20], [24], [25].

Aunque existen instrumentos de medición de radiointerferencia, las herramientas computacionales son de gran utilidad para predecir los niveles de ruido electromagnético que generaría una línea aún no instalada. Lo anterior sería de gran utilidad para diseñar la línea de tal forma que se tengan los menores perfiles de radiointerferencia posibles. Por tal





motivo, y con el fin de aumentar la confiabilidad de las herramientas computacionales, es necesario desarrollar métodos de cálculo cada vez más precisos y que tomen en consideración las características de la línea en particular.

1.3 OBJETIVOS.

- Desarrollar un método de cálculo para el análisis de perfiles de radiointerferencia generados por una línea de transmisión de alta tensión en presencia de corona, considerando el efecto skin en los conductores y en el retorno por tierra, ante distintas condiciones geométricas.
- Adicionalmente, validar la precisión del método desarrollado mediante comparaciones con mediciones publicadas por otros autores.
- Finalmente, evaluar distintas técnicas simples para la atenuación de radiointerferencia, tales como el empleo de mayor número de conductores por fase y el aumento en el espaciamiento entre subconductores del haz.

1.4 JUSTIFICACIÓN.

- El efecto corona es causa de pérdidas de potencia en líneas de transmisión, ruido audible y distorsión en la propagación de ondas. Dichos efectos pueden llegar a alcanzar valores económicamente considerables o molestias en la población aledaña a las líneas. La pérdida de potencia típica de acuerdo con [29], es de un 3% de la potencia transmitida por cada 100 km de la longitud de la línea.
- Por otro lado, la descarga corona da origen a una serie de emisiones electromagnéticas a altas frecuencias que pueden interferir con el funcionamiento de algunos dispositivos electromagnéticos localizados en la cercanía de las líneas.





Existen algunos métodos para la predicción de niveles de radiointerferencia, los cuáles se basan en la utilización de funciones de excitación y el cálculo de la intensidad de las corrientes de corona, para posteriormente determinar el campo eléctrico generado por la línea. Sin embargo, algunos parámetros como las constantes de atenuación suelen tomarse de valores promedio para ciertas configuraciones de línea. En este trabajo se presenta un método en el cual se encuentran las constantes de atenuación a partir del cálculo estricto de los parámetros eléctricos de la línea, de tal forma que se puede aplicar a líneas con diversas configuraciones geométricas.

- Aunque existen instrumentos de medición de niveles de radiointerferencia (RI), los métodos de predicción de RI son de gran utilidad en las fases de diseño y planeación de líneas de transmisión de alta tensión.

1.5 ESTADO DEL ARTE.

Uno de los primeros investigadores interesados en el estudio de la descarga corona fue F. W. Peek, quien desde 1912 llevó a cabo sus primeros experimentos con una línea de 275 m de longitud, alimentada por un transformador monofásico de 200 kV. Los diámetros de los conductores analizados por Peek en forma experimental fueron desde varios milímetros hasta una pulgada [1].

Posteriormente, un gran número de investigadores se interesaron por este fenómeno, entre ellos L. B. Loeb quien encabezó uno de los grupos de investigación que más han contribuido al conocimiento de la descarga corona. En 1965 Loeb publicó el libro titulado “*Electrical Coronas*” el cuál aún se considera una obra de consulta muy importante [5].

De ahí en adelante, varios investigadores se han enfocado en diferentes aspectos relacionados con la descarga corona; por ejemplo, algunos han realizado estudios experimentales en laboratorios de alta tensión [10], [14], [19], [48], mientras que otros han





preferido desarrollar modelos matemáticos para su representación en programas computacionales [33], [49], [53], [54]. También, existen investigadores que se han dedicado más bien al análisis de las consecuencias del efecto corona, principalmente las pérdidas de potencia, ruido audible y radiointerferencia. A continuación se listan algunos de los trabajos relacionados con el tema principal de este trabajo de tesis: la radiointerferencia debida al efecto corona en líneas de alta tensión.

Uno de los principales científicos que ha aportado grandes contribuciones al conocimiento de la radiointerferencia generada por corona en líneas de transmisión es Claude H. Gary, quien en 1971 publicó una serie de tres artículos en donde presentó un método para la predicción de niveles de radiointerferencia bajo condiciones de lluvia densa, utilizando un término denominado función de excitación, mediante el cual fue posible tomar en cuenta la naturaleza pulsante y aleatoria de la corriente corona [6]-[8]. En la actualidad, los trabajos realizados por Gary son ampliamente utilizados para el desarrollo de nuevos estudios realizados por otros investigadores.

En 1988, L. V. Timashova realizó mediciones de radiointerferencia en líneas de transmisión de 750 kV a una frecuencia de 500 kHz bajo diferentes condiciones climáticas. Sus resultados mostraron que bajo lluvia y nieve se generan los niveles más altos de radiointerferencia [9]. En 1990, Nakano y Sunaga desarrollaron una metodología para la predicción de radiointerferencia en líneas de transmisión de alta tensión y corriente directa (HVDC, por sus siglas en inglés) mediante el uso de “jaulas de corona” [10]. Posteriormente en 1992, Olsen y Chartier hicieron una comparación de varios métodos de cálculo de radiointerferencia desarrollados por diversos grupos de investigación, y optimizaron las fórmulas empíricas para la función de excitación mediante la adición de una constante, con el fin de minimizar las diferencias entre ellas. Además, recopilaron los resultados de mediciones de radiointerferencia realizadas para 9 líneas bajo buen clima y también en ambientes desfavorables [11]. En ese mismo año, Fern y Tietsworth realizaron un estudio relacionado con los inconvenientes que se originan en los sistemas de comunicación submarinos debido a la presencia de corona en algunos elementos de las antenas utilizadas en altas tensiones (100-500 kV) [12].





Más adelante, en 1994, Chartier y Blair analizaron los fenómenos causados por corona en una línea compacta de 230 kV. Se enfocaron básicamente en la interferencia sobre la radio y televisión, así como los niveles de ruido audible [13]. En ese mismo año, Lauersdorf y Feser notaron que las mediciones de descargas parciales se ven afectadas cuando existe corona. Así que propusieron utilizar algunos tipos de antenas especiales para la medición de descargas parciales eliminando los pulsos de corona [14]. En 1995, Giau publicó un trabajo en el cual analizaba los criterios para la correcta selección de los conductores de una línea teniendo en cuenta la interferencia electromagnética y ruido audible debidos a corona [15]. También en 1995, Olsen y Schennum propusieron un algoritmo para el cálculo de la interferencia electromagnética de líneas de transmisión con corona en un rango de frecuencias de 100 kHz – 30 MHz [16]. En ese mismo año, Jeong Boo y Kwang Ho realizaron un estudio sobre el efecto de los campos eléctricos y corona en una línea de transmisión de 765 kV, utilizando sistemas de instrumentación basados en sensores y diferentes antenas para la detección de ruido audible e interferencia en radio y TV [17]. A finales de 1995, Kumar y Garg analizaron la influencia de las líneas de alta tensión con corona sobre los sistemas de comunicación, enfocandose en los principales parámetros que influyen en la generación de ruido utilizando análisis de sensibilidad y la teoría modal para líneas multiconductoras [18].

Posteriormente, en 1997, Sinha y Baharudin publicaron los resultados experimentales que obtuvieron sobre pérdidas por corona y radiointerferencia usando varias configuraciones de electrodos como esfera-plano, punta-plano y punta-punta, aplicandoles altas tensiones de CA y CD [19]. En 1998, Pérez y Zavala efectuaron un estudio de la interferencia electromagnética a baja frecuencia producida por líneas de transmisión en derechos de vía [52]. En 1999, Kanya y Rajesh desarrollaron una herramienta computacional para el cálculo de campos magnéticos y eléctricos generados en la vecindad de una línea de alta tensión, lo anterior con el fin de predecir las pérdidas por corona, ruido audible y radiointerferencia que puede generar una línea [20]. Un año después, Phiboon y Vivek presentaron un método para la predicción de radiointerferencia debida a corona, bajo condiciones de clima





templado y también en ambientes donde la densidad del aire y conductividad del terreno varían considerablemente. Su método se enfocó principalmente en líneas de 500 kV [21].

En 2001, Allah y Alghamdi realizaron un estudio sobre el efecto corona en una línea de 220 kV de CA circuito doble, la cual era convertida en una línea de 220 kV de CD, analizando 4 alternativas para el circuito de conversión, y así seleccionar el más adecuado con el fin de tener los menores perfiles de radiointerferencia y ruido audible [22]. En el mismo año, Zhou y Sun publicaron un trabajo en donde comentaron los efectos en la salud de los campos electromagnéticos de baja frecuencia generados por líneas de transmisión y la interferencia sobre las líneas de comunicación debidas a corona. Se citaron también algunas de las normas que regulan las emisiones a baja frecuencia [23]. Entre 2002 y 2003, Nayak y Thomas publicaron un par de trabajos en donde presentaron un método de cálculo de campos de interferencia electromagnética debidos al efecto corona en líneas de transmisión de alta tensión. Obtuvieron resultados con respecto a la variación del diámetro de los conductores, niveles de tensión y frecuencia [24], [25].

Algunos de los trabajos más recientes han sido presentados por Zajc, Suljanovic, Mujcic y Tasic, quienes en 2004 publicaron los resultados de mediciones de ruido debido a corona en una línea de 400 kV, la cual también se utiliza para transmitir señales de comunicación por medio de PLC (Power Line Communication). Para realizar sus mediciones utilizaron unidades LTU (Line Trap Unit), circuitos de acoplamiento y analizadores de espectros [26]. Un año después, en 2005, los mismos autores desarrollaron un algoritmo para el cálculo de ruido por corona en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia. En el dominio de la frecuencia, el ruido por corona es representado por una densidad espectral de potencia, mientras que en el dominio del tiempo se hace a través de un ruido gaussiano de voltaje [27]. Finalmente en 2007, publicaron los resultados de mediciones en un rango bajo de frecuencias sobre una línea de alta tensión bajo diferentes condiciones ambientales. El conocimiento de las características de frecuencia es utilizado para el correcto diseño de sistemas PLC [28].





Otro de los trabajos relacionados con las emisiones electromagnéticas de líneas de transmisión fue el realizado por Rangel y Linares, quienes en 2007 propusieron un método para cuantificar las emisiones de campo radiadas por líneas de transmisión cuando se utilizan como medio de comunicación con tecnología BPL (Broadband Power Line) [50]. En ese mismo año, Ramírez y Figueroa realizaron mediciones de tensión inducida y campo eléctrico de 60 Hz bajo líneas de transmisión de 115 y 230 kV, utilizando sondas capacitivas a diferentes alturas sobre el terreno [51].

1.6 LIMITACIONES Y ALCANCES DEL TRABAJO

Limitaciones:

- El método presentado para el cálculo de perfiles de radiointerferencia generada por corona en una línea de transmisión, es aplicable para líneas en circuito simple, es decir, para analizar líneas de transmisión en circuito doble se tendrían que hacer las adecuaciones necesarias, relacionadas con el cálculo de los campos de interferencia generados por cada uno de los circuitos y la obtención del campo total.
- El método computacional propuesto se puede utilizar para el cálculo de perfiles de radiointerferencia sólo para líneas de transmisión de alta tensión en CA.
- Los perfiles de radiointerferencia se obtuvieron para condiciones climáticas de lluvia densa y a una altura de 0 m sobre el nivel de mar. Sin embargo, es posible obtener los perfiles de RI a otras altitudes aplicando un factor de corrección.
- Las mediciones experimentales con las que se compararon los resultados del método computacional propuesto se obtuvieron de literatura publicada en 1992. Los instrumentos empleados en ese tiempo pudieran tener ciertas limitaciones con respecto al equipo con el que se cuenta en la actualidad, ya que los equipos de medición más recientes cuentan con una mayor precisión.





Alcances:

- Las constantes de atenuación empleadas en el cálculo de los niveles de radiointerferencia se obtienen a partir del cálculo de parámetros de la línea en particular y para desacoplar el sistema se aplica descomposición modal, de tal forma que se pueden analizar líneas de transmisión con configuraciones geométricas arbitrarias.
- La validación del método computacional propuesto se realiza mediante comparación con mediciones experimentales publicadas por otros investigadores.
- La resistividad de terreno se toma en consideración en los cálculos de perfiles de radiointerferencia, de tal forma que, a diferencia de otros métodos, no es necesario hacer correcciones a los resultados finales con respecto a la resistividad de terreno.
- Con el método presentado, es posible determinar el nivel de radiointerferencia a cualquier distancia práctica de la línea de transmisión.

1.7 APORTACIONES DE LA TESIS.

Como aportaciones sobresalientes del presente trabajo se pueden citar las siguientes:

- Se propone un método para la predicción de niveles de radiointerferencia que puede generar una línea de transmisión monofásica o multiconductora de alta tensión con corona, bajo condiciones de lluvia densa. Dicho método toma en consideración las características geométricas de la línea en particular, mediante el cálculo de constantes de atenuación a partir de los parámetros de la línea. En particular, para el cálculo de la impedancia serie de la línea se considera el efecto skin por medio del concepto de profundidad de penetración compleja tanto en el conductor como en el retorno por tierra. Por otro lado, para desacoplar el sistema, se aplica





descomposición modal. Con las consideraciones anteriores, es posible aplicar el método de cálculo de niveles de radiointerferencia para cualquier configuración de línea, logrando obtener resultados más precisos.

- También, se analizó la influencia de la variación del número de conductores por haz y espaciamiento entre subconductores, en los perfiles de radiointerferencia de la línea. Con lo anterior fue posible cuantificar la atenuación en los niveles de radiointerferencia al aplicar estas técnicas. Se muestra la existencia de una distancia óptima para la separación entre subconductores.

1.8 ESTRUCTURA DE LA TESIS.

- Capítulo I. Se presenta una introducción al trabajo de tesis, mencionando los objetivos y la justificación del mismo. También se añade una sección en donde se comentan los trabajos realizados por diversos investigadores desde hace alrededor de 40 años, así como los estudios realizados recientemente.
- Capítulo II. Se expone la introducción teórica referente al efecto corona. Se explica el proceso de ionización del aire que circunda a los conductores de alta tensión y que da lugar a la aparición de la descarga corona. También se presenta la forma de onda típica de la corriente corona, la cual se obtuvo mediante experimentos realizados en el laboratorio de alta tensión de la ESIME – ZAC. Además, se da una breve explicación de las principales consecuencias del efecto corona y los criterios generales que se toman en cuenta para su modelado.
- Capítulo III. Se describen los fundamentos teóricos de la consecuencia del efecto corona de principal interés en este trabajo: la radiointerferencia (RI). Se da una interpretación desde el punto de vista eléctrico a los fenómenos presentes en el área circundante a los conductores de alta tensión debido al efecto corona. Asimismo, se comentan las consideraciones necesarias en la determinación de los niveles de RI





emitidas por una línea de transmisión a diferentes distancias. Adicionalmente, se expone el funcionamiento básico de un instrumento de medición de radiointerferencia y los sistemas de antena que son comúnmente utilizados.

- Capítulo IV. Se detalla el método para calcular los niveles de radiointerferencia que generan líneas de transmisión con corona tanto monofásicas como multiconductoras. Dicho método está basado en el propuesto por Gary, pero con algunas mejoras relacionadas con el cálculo de las constantes de atenuación y la aplicación de descomposición modal. También, se presentan varios ejemplos de aplicación para diferentes configuraciones de líneas, y comparaciones realizadas con mediciones publicadas por otros autores, las cuales muestran que con las modificaciones mencionadas anteriormente se obtienen mejores resultados.
- Capítulo V. Se exponen algunas técnicas para la atenuación de los niveles de radiointerferencia. Básicamente, se busca aumentar el radio equivalente de los conductores, con el fin de disminuir el campo eléctrico superficial, lo cual se puede lograr con la modificación del espaciamiento entre subconductores del haz, pero más notablemente con el aumento de subconductores por fase. Aunado a lo anterior se muestran algunas simulaciones realizadas con la aplicación del método de elemento finito para analizar la distribución del campo eléctrico en la superficie de los conductores, utilizando diferentes arreglos de haz.
- Capítulo VI. Se presentan las conclusiones generales de este trabajo, las aportaciones de la tesis y las recomendaciones para trabajos futuros.
- Apéndice A. Se describe paso a paso la metodología para el cálculo de los parámetros eléctricos de una línea de transmisión monofásica y multiconductora. Esta parte es fundamental en el método para la determinación de niveles de RI presentado en el capítulo IV.
- Apéndice B. Se presentan los artículos generados de este trabajo de tesis.





CAPÍTULO II

EL CONCEPTO DE EFECTO CORONA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN.

El efecto corona es un fenómeno característico de los sistemas de alta tensión, el cual se presenta cuando el potencial de un conductor es lo suficientemente elevado para originar una intensidad de campo eléctrico igual o superior a la rigidez dieléctrica del medio gaseoso que lo circunda, que en el caso de las líneas de transmisión aéreas corresponde al aire. Debido a la alta intensidad de campo eléctrico el aire alrededor del conductor se ioniza y se convierte en conductor, lo cual puede representarse como un aumento en el diámetro del conductor. En la Fig. 2.1 se muestra este fenómeno [3], [29].

La presencia de corona se manifiesta por luminiscencias, un sonido silbante y se percibe también la formación de ozono. Por otro lado, este fenómeno es causa de pérdidas de energía, distorsión en la propagación de ondas, así como de oscilaciones electromagnéticas de alta frecuencia que se transmiten a lo largo de la línea y que provocan perturbaciones en las señales de radio y televisión en sus inmediaciones (radiointerferencia) [1].

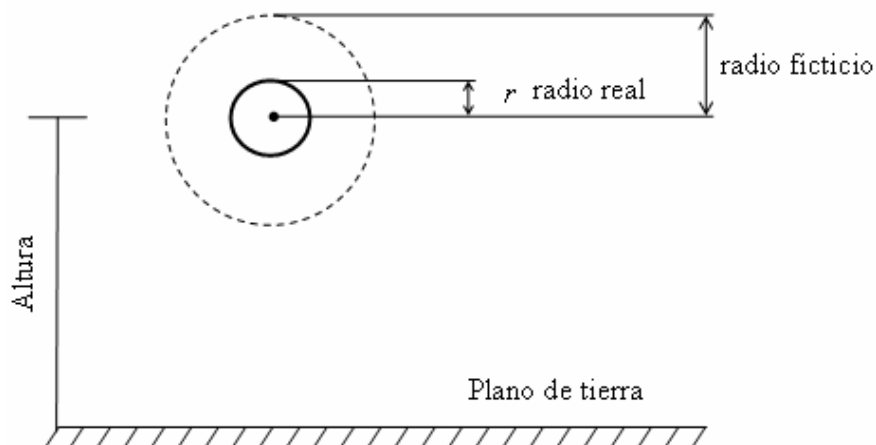


Fig. 2.1. Conductor con efecto corona.



Básicamente el efecto corona es función de dos elementos: el gradiente de potencial en la superficie del conductor y la rigidez dieléctrica del aire en la superficie, valor que a su vez depende de la presión atmosférica y la temperatura.

En un campo eléctrico uniforme, a 25 °C y 760 mm Hg de presión, la ionización por impacto aparece al tener una intensidad de campo eléctrico de 29.8 kV/cm (valor pico), que corresponde a 21.1 kV/cm (valor eficaz o rms). El valor del gradiente de potencial para el cual aparece la ionización en la superficie del conductor se llama gradiente crítico o de inyección [1], [3].

Los fenómenos principales ocasionados por el efecto corona pueden resumirse como sigue [1], [29]:

- Descarga luminosa.
- Ruido audible.
- Formación de ozono.
- Radiación electromagnética a altas frecuencias.
- Distorsión en la propagación de ondas.

2.2 PROCESO BÁSICO DE IONIZACIÓN.

El aire es probablemente el aislante más importante utilizado en líneas de transmisión de alta tensión. Aparte de las cadenas de aisladores, se considera al aire como el aislamiento principal entre conductores y estructuras metálicas, así como entre conductores y el plano de tierra. Por lo anterior, es de gran importancia conocer las características físicas y eléctricas del aire así como las condiciones bajo las cuales sus propiedades dieléctricas se alteran [3].

La física de la descarga corona envuelve el análisis de procesos de ionización complejos que se presentan en el aire que rodea al conductor energizado. El objetivo de este trabajo no es profundizar en las razones físicas que dan origen a la descarga corona, sino más bien,





analizar una de las consecuencias de este fenómeno que es la interferencia electromagnética. Por esta razón sólo se consideran los fundamentos teóricos elementales.

Básicamente, los iones y electrones libres en el aire, que han sido generados por radiación cósmica o radioactiva, se ven expuestos a la influencia del campo eléctrico del conductor energizado. En el caso de corriente alterna, las partículas son atraídas y repelidas debido a que la polaridad cambia cada semiciclo. Si la intensidad del campo eléctrico es lo suficientemente elevado, las partículas adquieren la energía cinética necesaria para ionizar por colisión a otras partículas neutras, lo cual se conoce como *ionización por impacto* [1], [2].

La multiplicación de los electrones se ilustra en la Fig. 2.2. Durante el proceso de aceleración debido al campo eléctrico, el electrón colisiona con los átomos de nitrógeno, oxígeno y otros gases presentes, algo parecido al choque de dos bolas de billar. Los electrones pierden sólo una pequeña parte de su energía cinética en cada colisión. El proceso básico de ionización, es usualmente representado por:



donde A es el átomo neutro del gas, e es la carga del electrón y A^+ es el ión positivo.

Después de que un electrón colisiona con un átomo, se libera otro electrón. Cada uno de estos electrones puede entonces liberar dos electrones más. La reacción en cadena provoca que la cantidad de electrones incremente rápidamente. El número de electrones formados durante el proceso de la avalancha fue determinado por Townsend quien a través de varios experimentos de descarga en gases, determinó un coeficiente llamado primer coeficiente de ionización de Townsend, con el cual es posible determinar el número de electrones producidos por un electrón viajando a una distancia de 1 cm bajo la influencia de un campo uniforme [1], [2]. La corriente de la descarga en el proceso de la avalancha se obtiene de acuerdo con:

$$I = I_0 e^{\alpha_1 d} \quad (2.2)$$





donde:

I = corriente de la descarga.

I_0 = Corriente inicial en el gas debido a fuentes externas.

α_1 = primer coeficiente de ionización de Townsend.

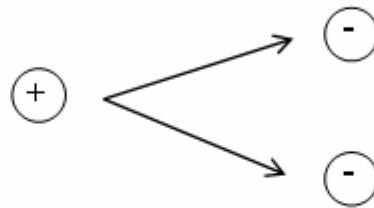
d = distancia del gap.

El coeficiente α_1 depende de la intensidad del campo eléctrico, presión del gas y otras condiciones que influyen en la generación de pares de electrones [2].

a) Iniciación.



b) Formación de un par de electrones.



c) Multiplicación.

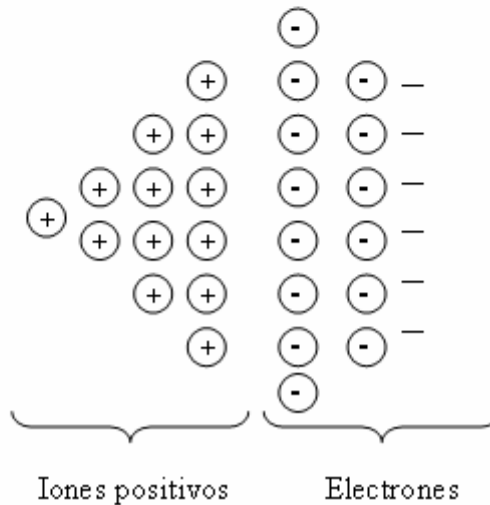


Fig. 2.2. Avalancha de electrones de un electrodo negativo.



2.3 MEDICIÓN DE LA CORRIENTE CORONA.

Una de las configuraciones de electrodos más utilizadas para el estudio experimental del efecto corona es el arreglo punta – plano [19]. El radio de la curvatura de la punta se selecciona de acuerdo al grado de no uniformidad de campo que se desea. La tensión es aplicada al electrodo punta mientras que en el electrodo plano se realizan las mediciones de la corriente corona. La polaridad del electrodo energizado determina la dirección del gradiente de potencial y el flujo de las partículas cargadas [30]. Existen también otras geometrías de electrodos comúnmente utilizadas como los arreglos plano-plano, esfera-plano, conductor-plano y conductor-cilindro.

En el desarrollo de este trabajo se llevo a cabo una medición experimental de corriente corona en CD, realizada en el laboratorio de alta tensión de la ESIME – IPN Unidad Zacatenco. A fin de simular una línea de transmisión, se utilizó un arreglo que consta de un conductor colocado en el eje axial de un cilindro. Dicho cilindro está dividido en tres secciones: la parte central es utilizada para la medición de la corriente corona mientras que los extremos sirven de guarda para eliminar los efectos de borde. El cilindro está hecho de aluminio y tiene un diámetro de 34.5 cm. El conductor utilizado es de cobre de 1 mm de diámetro, con una imperfección a la mitad de su longitud con el fin de propiciar la aparición de efecto corona en ese punto. La tensión aplicada fue de 14.2 kV de CD de polaridad positiva.

Para la generación de alta tensión de CD, se utilizó una fuente BERTAN serie 205B, de 50 kV, 0.3 mA. La corriente corona se mide a través de la caída de tensión en una resistencia de 1 k Ω , utilizando un osciloscopio Tektronix TDS684B de 4 canales, 5 gigamuestras por segundo y un ancho de banda de 1 GHz. También se utilizaron cables coaxiales de 50 Ω con una carga en terminales también de 50 Ω con el fin de evitar reflexiones. En la Fig. 2.3 se muestra un esquema del arreglo utilizado y en la Fig. 2.4 se observa la gráfica de la corriente corona medida, en donde es posible apreciar la forma de onda pulsada típica que adopta dicha corriente en uno de sus regímenes.



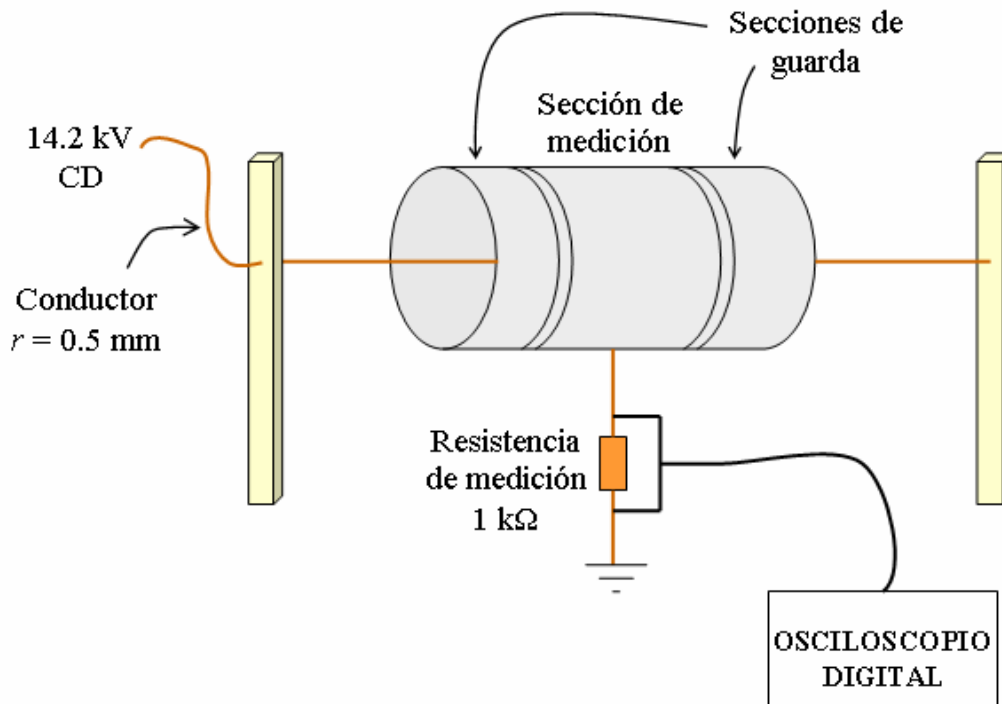


Fig. 2.3. Arreglo experimental para la medición de corriente corona.

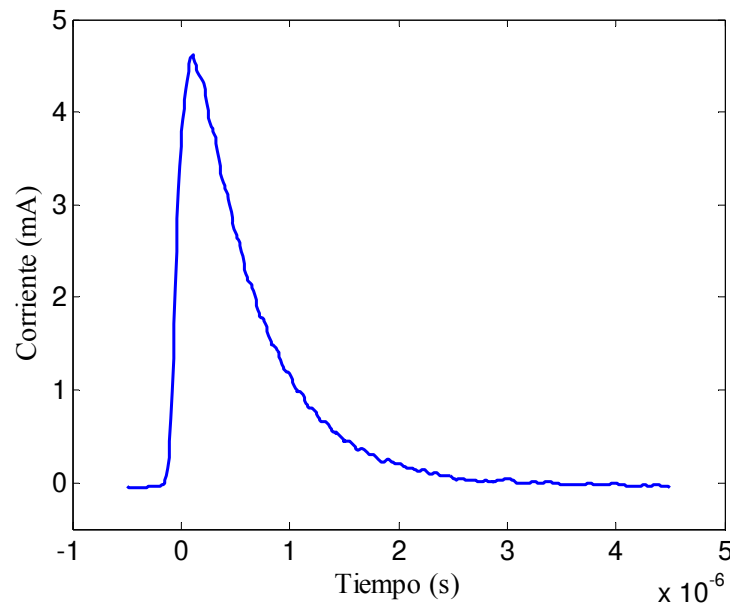


Fig. 2.4. Pulso de corriente corona medida en un arreglo coaxial.





2.4 GRADIENTE DE INCEPCIÓN DE CORONA.

El cálculo del gradiente eléctrico en la superficie del conductor, en particular el denominado *gradiente crítico* o de inyección E_c , a partir de cual se observan descargas del tipo corona, es de gran importancia para el cálculo de pérdidas por corona, ruido audible, así como para determinar los niveles de radiointerferencia que se generan debido a este fenómeno. El gradiente de inyección de corona es función del diámetro del conductor, la condición de su superficie, polaridad (en el caso de CD), además de factores ambientales como la presión atmosférica y la temperatura. La fórmula de Peek, obtenida empíricamente, es la más empleada para el cálculo del gradiente de inyección de corona en conductores cilíndricos [1]-[3].

$$E_c = mE_0\delta \left(1 + \frac{K}{\sqrt{\delta r}} \right) \quad (\text{kV/cm}) \quad (2.3)$$

donde (para CA):

E_0 es la rigidez dieléctrica con un valor usual de 29.8 kV/cm (valor pico) o 21.1 kV/cm (valor eficaz o rms).

K es una constante empírica dada por:

0.301 para el caso de dos conductores paralelos sobre tierra.

0.308 para una geometría cilíndrica concéntrica.

m es un factor de irregularidad de la superficie del conductor dado por:

1 para conductor ideal (limpio y sin irregularidades).

0.75 a 0.85 para un conductor trenzado (valor típico).

0.3 a 0.6 bajo condiciones de lluvia, nieve, niebla pesada.

r = radio del conductor en cm.

δ es la densidad relativa del aire dada por: $\delta = \frac{273 + t_0}{273 + t} \frac{p}{p_0}$

donde t es la temperatura y p es la presión del aire, t_0 y p_0 son valores estándar ($t_0 = 25^\circ \text{C}$, $p_0 = 760 \text{ mmHg}$).

A continuación se presentan las fórmulas necesarias para el cálculo del gradiente de inyección en los arreglos mostrados en las Figs. 2.5 a 2.7 [2].



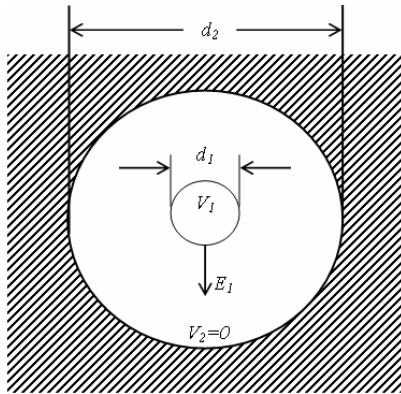


Fig. 2.5. Cilindros concéntricos.

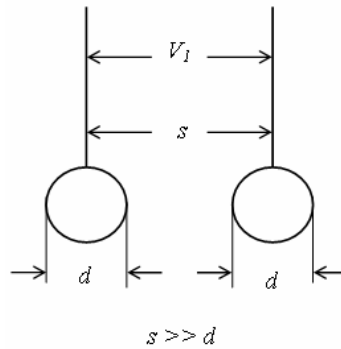


Fig. 2.6. Conductores paralelos.

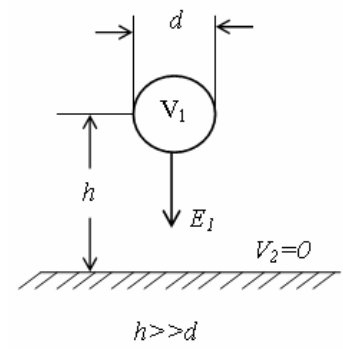


Fig. 2.7. Conductor paralelo a un plano.

$$E_1 = \frac{2V_1}{d_1 \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}$$

$$E_1 = \frac{V_1}{d \ln\left(\frac{2s}{d}\right)}$$

$$E_1 = \frac{2V_1}{d \ln\left(\frac{4h}{d}\right)}$$

$$C = \frac{55.6 \times 10^{-12}}{\ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)}$$

$$C = \frac{27.8 \times 10^{-12}}{\ln\left(\frac{2s}{d}\right)}$$

$$C = \frac{55.6 \times 10^{-12}}{\ln\left(\frac{4h}{d}\right)}$$

$$E_c = 31m\delta \left(1 + \frac{0.436}{\sqrt{\delta d_1}}\right) \text{ kV/cm}$$

$$E_c = 30m\delta \left(1 + \frac{0.426}{\sqrt{\delta d}}\right) \text{ kV/cm}$$

$$V_c = E_c \left(\frac{d_1}{2}\right) \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right)$$

$$V_c = E_c d \ln\left(\frac{2s}{d}\right)$$

$$V_c = E_c \left(\frac{d}{2}\right) \ln\left(\frac{4h}{d}\right)$$

donde:

E_1 = Gradiente en la superficie del conductor en kV/cm.

C = Capacitancia en F/m.

E_c = Gradientes de inepción de corona en kV/cm.

V_c = Tensión de inepción de corona en kV.

Para el cálculo de E_c se consideran todas las dimensiones en centímetros.





2.5 PÉRDIDAS POR CORONA.

Como se ha mencionado previamente, adicionalmente a la corriente, la descarga corona propicia la aparición de otros fenómenos como descarga luminosa, calor, ruido audible y radiointerferencia, los cuales conllevan una liberación de energía que bien puede expresarse como una pérdida de potencia por unidad de longitud (kW/km). Las pérdidas de potencia debidas a corona en líneas de transmisión y sus repercusiones económicas, fueron las primeras consecuencias de la descarga corona estudiadas en los inicios de la transmisión en alta tensión, ya que contribuyen en la reducción de la eficiencia de los sistemas de transmisión. Los estudios que se han realizado con diferentes geometrías de conductores, gradientes, tipo de tensión y condiciones ambientales, han mostrado que en ambientes secos se tienen pérdidas de unos pocos kilowatts por kilómetro, mientras que en ambientes de lluvia o nieve se presentan pérdidas de cientos de kilowatts por kilómetro [1], [2].

Por otro lado, se ha encontrado que en general las pérdidas por corona son sólo una pequeña parte de las pérdidas por efecto Joule (I^2R). Además, conforme aumentan los niveles de tensión de transmisión, las pérdidas por corona tienen un impacto cada vez menor en la selección del tamaño del conductor y geometría de la línea, mientras que el ruido audible y la interferencia electromagnética generados tienen cada vez mayor importancia [2].

2.5.1 Cálculo de Pérdidas por Corona.

En 1911, Peek y su grupo determinaron una fórmula para el cálculo de pérdidas por corona la cual es expresada por la siguiente relación cuadrática [1], [2]:

$$P_{cor} = k(V - V_c)^2 \times 10^{-5} \quad \text{en kW/km} \quad (2.4)$$

donde:





k es un factor dado por: $k = \frac{242}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{r}{s}}$

P_{cor} = pérdidas en kW/km.

V = tensión de fase a tierra en kV (rms).

V_c = tensión de inyección de corona a tierra en kV (rms).

f = frecuencia en Hz.

δ = densidad del aire.

r = radio del conductor en cm.

s = separación entre conductores en cm.

Sin embargo, esta fórmula no es válida para los valores cercanos a la tensión de inyección. En 1924, Ryan y Henline propusieron la siguiente fórmula para el cálculo de pérdidas en ambiente seco:

$$P_{cor} = 4fCV(V - V_c) \quad (2.5)$$

donde:

P_{cor} = pérdidas en kW/km.

V = tensión de fase a tierra en kV (rms).

V_c = tensión de inyección de corona a tierra en kV (rms).

f = frecuencia del voltaje aplicado en Hz.

C = capacitancia de línea tierra del conductor.

En vista de que la potencia es proporcional a VI , y por ende sus pérdidas también lo son, puede suponerse que el término $4fC(V - V_c)$ representa una corriente de corona equivalente, la cual se presenta cuando la tensión del conductor excede la tensión de inyección.

En 1933 en una reunión de la AIEE (American Institute of Electrical Engineers), Peterson expuso una fórmula para el cálculo de pérdidas por corona para una línea monofásica bajo ambientes favorables:

$$P_{cor} = \frac{20.96(10^{-6})}{[\log_{10}(2s/d)]^2} fV^2F \quad \text{en kW/km} \quad (2.6)$$





donde:

P_{cor} = pérdidas en kW/km.

f = frecuencia en Hz.

V = tensión de fase a tierra en kV (rms).

s = separación entre conductores en cm.

d = diámetro del conductor en cm.

F = factor determinado por experimentos el cuál es función de la relación V/V_c .

2.6 RUIDO AUDIBLE.

Actualmente, el ruido audible generado por líneas de transmisión de alta tensión con corona se ha considerado un asunto de gran importancia. Generalmente, en un ambiente seco el gradiente eléctrico en la superficie de los conductores se encuentra por debajo del gradiente de inyección de corona, por lo cual están presentes muy pocas fuentes de corona. El ruido audible se hace presente principalmente bajo malas condiciones climáticas como lluvia o nieve. Sin embargo, se puede decir que los sistemas de transmisión contribuyen muy poco en la generación de ruido audible comparado con otras fuentes [4].

La importancia del ruido audible generado por líneas instaladas en poblaciones rurales es mínima debido a que la densidad de población es baja. Sin embargo, en las grandes ciudades se ha desarrollado la tendencia de controlar el ruido debido a las consecuencias físicas en los seres humanos. Aunque en un principio las líneas de transmisión no habían sido objeto de reclamos debido al ruido audible, el uso de tensiones cada vez mayores ha propiciado consecuentemente que los niveles de ruido sean más intensos [1].

Es muy difícil definir el nivel de ruido de una línea de transmisión que puede ser tolerado, no obstante es muy común recibir quejas de la población cuando los niveles de ruido son mayores a 55 dB. Para áreas residenciales es recomendable no sobrepasar los 45 dB [4].





2.6.1 Cálculo de Ruido Audible.

Para obtener el nivel total de ruido de una línea de transmisión, primeramente se debe de calcular el potencial de ruido de cada uno de los conductores con la siguiente ecuación obtenida empíricamente [31]:

$$NP_{Ai} = -164.6 + 120 \log E_i + 55 \log r_{e,i} \quad (2.7)$$

donde E_i es la intensidad de campo eléctrico en kV/cm y r_e es el radio equivalente de acuerdo con:

$$r_e = r \quad \text{para } n_c \leq 2 \quad (2.8)$$

y

$$r_e = 0.58 n_c^{0.48} r \quad \text{para } n_c \geq 3 \quad (2.9)$$

donde n_c es el número de subconductores y r el radio del subconductor en mm.

El nivel de ruido total en algún punto cercano a la línea puede ser determinado por [31]:

$$NP = 10 \log \left\{ \sum_{i=1}^n \exp[0.23(NP_{Ai} - 11.4 \log D_{Li} - 5.8)] \right\} \quad (2.10)$$

Donde n es el número de fases y D_{Li} la distancia en metros entre el conductor i y el punto de referencia (punto de medición).

2.7 RADIOINTERFERENCIA.

Esta es la consecuencia del efecto corona de principal interés en este trabajo. La interferencia electromagnética puede definirse como una degradación en el desempeño de un equipo, canal de transmisión o sistema causado por un disturbio electromagnético [3]. Debido a la naturaleza pulsante de las corrientes debidas a corona, se generan campos electromagnéticos que producen perturbaciones en un amplio rango de frecuencias en la





operación de sistemas de comunicación. En el Capítulo 3 se profundizara más acerca de los aspectos relacionados con este fenómeno.

2.8 DISTORSIÓN EN LA PROPAGACIÓN DE ONDAS.

Otro fenómeno de importancia relacionado con el efecto corona es la distorsión de las ondas viajeras en la respuesta transitoria de las líneas de transmisión. Aunado a las investigaciones experimentales en laboratorios de alta tensión efectuadas por varios grupos de investigación, existen otros que se han enfocado al desarrollo de modelos matemáticos del efecto corona para estudios de transitorios electromagnéticos. Generalmente, el efecto corona es modelado como una capacitancia no lineal dependiente de la tensión que es añadida a la capacitancia geométrica de la línea. Este concepto general del modelo de corona ha sido aceptado por muchos investigadores, pero los métodos de implementación difieren de un autor a otro. Muchos métodos envuelven el uso de las siguientes técnicas [32]:

- a) Aplicación de diferencias finitas a las ecuaciones de la línea.
- b) Representación de circuitos PI en cascada con elementos no lineales en paralelo.
- c) División de la línea en secciones lineales con elementos no lineales en paralelo en cada unión.

2.8.1 Representación de corona para análisis de propagación de ondas.

Una descripción muy común de corona es a través de las curvas $q - V$ (carga – voltaje). En la Fig. 2.8 se muestra una curva $q - V$ típica para un conductor cilíndrico colocado horizontalmente a una cierta altura sobre el plano de tierra. Cuando la tensión de la línea sobrepasa el valor de V_c , llamado tensión de inyección de corona, el aire alrededor del conductor se ioniza y por tanto almacena carga. Este es el fenómeno de corona cuyo efecto en la propagación de ondas es el incremento en la capacitancia de la línea, como se observa en la Fig. 2.8 [33].



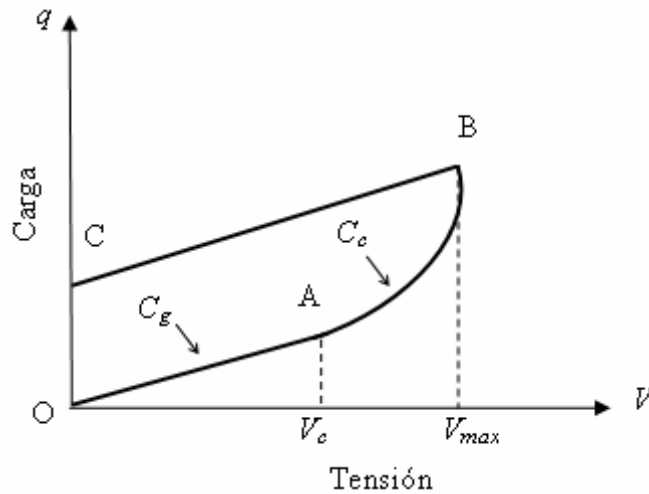


Fig. 2.8. Curva $q - V$ (carga - voltaje).

El segmento OA de la Fig. 2.8 corresponde a la sección lineal de la curva $q - V$, en la cual aún no se ha producido el efecto corona. A medida que la tensión se incrementa, la carga es proporcional a éste, siendo la constante de proporcionalidad en este segmento la capacitancia geométrica, C_g . El punto A se define como el punto de inceptión de corona [34].

Cuando la tensión alcanza el punto A, la línea entra en corona manifestándose como el incremento continuo de la derivada de la carga respecto a la tensión, conocida como capacitancia de corona C_c . Lo anterior quiere decir que un incremento en la tensión conduce a un incremento en la capacitancia de corona; esto se manifiesta en la parte AB de la Fig. 2.8. Finalmente, cuando la tensión llega a su máximo valor que es el punto B y comienza a decrecer (BC) la carga tiene un comportamiento similar al de la parte OA. En el estudio de transitorios rápidos, de duración menor a un milisegundo, la pendiente de la parte BC suele considerarse igual a C_g ; es decir igual a la pendiente de OA [33].

La sección AB de la Fig. 2.8 es la parte de especial interés cuando se realizan estudios de propagación de ondas transitorias. Existe una gran variedad de modelos basados en las curvas $q - V$ que se pueden clasificar en tres tipos [33], [35]:



1. Modelos Piezolineales.
2. Modelos Parabólicos.
3. Modelos Dinámicos.

1) Modelos Piezolineales: Este tipo de modelos consiste en aproximar la parte no lineal (segmento AB) de la Fig. 2.8 mediante segmentos rectos.

2) Modelos Parabólicos: En el caso de los modelos parabólicos, el segmento no lineal AB de la curva $q - V$ se aproxima mediante una parábola generalizada, es decir, el exponente no necesariamente es dos. Un ejemplo de este tipo de modelos que fue propuesto por Gary, Cristescu y Dragan [35] es el siguiente:

$$C_C = \begin{cases} C_g & V \leq V_c, \quad \partial v / \partial t > 0 \\ C_g n_1 \left(\frac{V}{V_c} \right)^{n-1} & V > V_c, \quad \partial v / \partial t > 0 \\ C_g & \partial v / \partial t \leq 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

donde V_c es la tensión de inyección de corona y n_1 es un parámetro que depende de la polaridad, el radio del conductor y del número de conductores en haz.

Las ecuaciones (2.11) representan la capacitancia de corona en el segmento AB de la Fig. 2.8. Cuando la tensión de la línea es menor a la tensión de inyección de corona, la capacitancia de corona C_c , es igual a la capacitancia geométrica C_g .

3) Modelos Dinámicos: En este tipo de modelos se considera que la carga no sólo depende de la tensión, sino también de la velocidad de cambio de dicha tensión, es decir, $C_c = f(v, \partial v / \partial t)$ [33].





CAPÍTULO III

RADIOINTERFERENCIA POR CORONA EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

3.1 INTRODUCCIÓN.

Las líneas de transmisión de alta tensión tienen el propósito de transportar la energía eléctrica desde las centrales generadoras hasta los centros de consumo en condiciones óptimas de operación a una frecuencia nominal (50/60 Hz). En condiciones normales, las líneas producen emisiones electromagnéticas en un amplio rango de frecuencias las cuales pueden interferir con el funcionamiento normal de algunos dispositivos electromagnéticos localizados en la cercanía de las líneas, además de provocar un impacto físico y biológico en el ambiente [43], [44]. Generalmente, en las líneas de transmisión de alta tensión se presenta un fenómeno que propicia las emisiones electromagnéticas a altas frecuencias llamado efecto corona. Este efecto produce emisiones electromagnéticas primordialmente a frecuencias por debajo de los 3MHz e interfiere, entre otros dispositivos, con la recepción de radio en Amplitud Modulada (AM) en la banda de 0.535 a 1.605 MHz. Es por ello que las emisiones electromagnéticas debidas a corona suelen definirse como “radiointerferencia”, (RI) [3]. Sin embargo, dados los avances en la tecnología en las últimas décadas, los problemas de compatibilidad electromagnética debidos a este fenómeno abarcan una gama de dispositivos de telecomunicación cada vez mayor [42].

Las líneas de transmisión con corona son entonces fuentes sustanciales de interferencia electromagnética. Los factores que suelen ejercer influencia sobre el nivel de interferencia son, entre otros, la proximidad de la línea al receptor de la radiofrecuencia, la orientación de la antena receptora, la geometría utilizada en el esquema de transmisión y las condiciones climáticas [1], [2].





Si la frecuencia de la emisión electromagnética debida a corona en una línea de transmisión coincide con la frecuencia de la señal transmitida por un sistema de comunicación cercano a la misma, entonces la señal transmitida puede ser distorsionada. Para mitigar este efecto, el sistema de comunicación debe colocarse a una distancia segura de la línea. Por esta razón es necesario estimar los niveles de radiointerferencia a diferentes distancias de la línea [24].

En los estudios de compatibilidad electromagnética se utilizan diversas unidades de medición, tales como V/m para el campo eléctrico y A/m para el campo magnético. El rango numérico de estas cantidades puede ser bastante amplio; por ejemplo, los campos eléctricos pueden tener valores que van desde 1 $\mu\text{V/m}$ hasta 200 V/m, lo cual representa un rango del orden de 10^8 . Debido a este amplio rango de valores, las unidades de medición se suelen expresar en decibeles (dB). La ventaja de utilizar dB radica en que se logra comprimir la información disminuyendo los rangos de valores para facilitar su manipulación. El rango de valores mencionado de 10^8 correspondería a 160 dB [42]. Debido a lo anterior, en este trabajo los perfiles de radiointerferencia de líneas de transmisión se representan en dB, como se mostrará en el capítulo IV.

3.2 DESCRIPCIÓN FÍSICA DE LA RI DEBIDA AL EFECTO CORONA.

Generalmente, el efecto corona se presenta en puntos distribuidos aleatoriamente a lo largo de los conductores de la línea. El número de fuentes de corona depende en gran manera de las condiciones climáticas. Por ejemplo, para un buen clima (templado, sin lluvia) se generan unas cuantas fuentes de corona separadas por largas distancias. Por otro lado, bajo malas condiciones climáticas (lluvia, nieve), el número de fuentes de corona así como la intensidad de las descargas será mucho mayor [3].

La descarga corona en cada punto de generación en el conductor se caracteriza por diferentes modos o tipos de corona. En general, los modos de streamer tipo *trichel* y de *inceptión* son los primeros en ocurrir durante los semiciclos negativo y positivo de la onda





de tensión, respectivamente. Estos dos modos de corona generan pulsos de corriente con tiempo de elevación rápido y corta duración [1].

Los pulsos de corriente de corona negativos en general tienen tiempos de elevación más rápidos y duraciones más cortas que los pulsos positivos, mientras que las amplitudes de los pulsos positivos son regularmente mayores que las de pulsos negativos. Debido a lo anterior, los pulsos positivos se consideran como la fuente predominante de radiointerferencia, aunque los pulsos negativos pueden ser de importancia a mayores frecuencias. En la Tabla 3.1 se muestran los rangos típicos de los parámetros principales de los pulsos corona positivo y negativo [3].

Tabla 3.1. Parámetros típicos de los pulsos corona positivo y negativo.

Tipo de pulso	Amplitud (mA)	Tiempo de frente de onda (ns)	Duración (ns)	Tasa de repetición (pulsos/s)
Positivo	10 – 50	50	250	$10^3 - 5 \times 10^3$
Negativo	1 – 10	10	100	$10^4 - 10^5$

En el dominio del tiempo, pulsos similares a los de la Fig. 3.1 pueden representarse en términos de una doble exponencial de la forma:

$$i(t) = Ki_p(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}), t \geq 0 \quad (3.1)$$

donde:

i_p = amplitud de corriente en mA.

K , α , y β son constantes que definen la forma de onda particular, las cuales se obtienen empíricamente [3].

Como ejemplo, pulsos típicos generados por descargas corona positivas y negativas tienen las siguientes definiciones:

$$\text{Positivo} \rightarrow i(t) = 2.335i_p(e^{-0.01t} - e^{-0.0345t})$$

$$\text{Negativo} \rightarrow i(t) = 1.3i_p(e^{-0.019t} - e^{-0.285t})$$





con t dado en nanosegundos. En la Fig. 3.1 se muestran las formas de onda de los pulsos para corona positiva y negativa con i_p de 20 mA y 5 mA respectivamente.

Cada descarga corona se comporta como una fuente de corriente, la cual inyecta un tren de pulsos de naturaleza aleatoria al conductor. Cada pulso de corriente inyectado se divide a su vez en 2 pulsos con la mitad de la amplitud del pulso original. Dichos pulsos viajan en direcciones opuestas a lo largo del conductor y van distorsionándose y atenuándose hasta que se vuelven insignificantes a una cierta distancia del punto de origen.

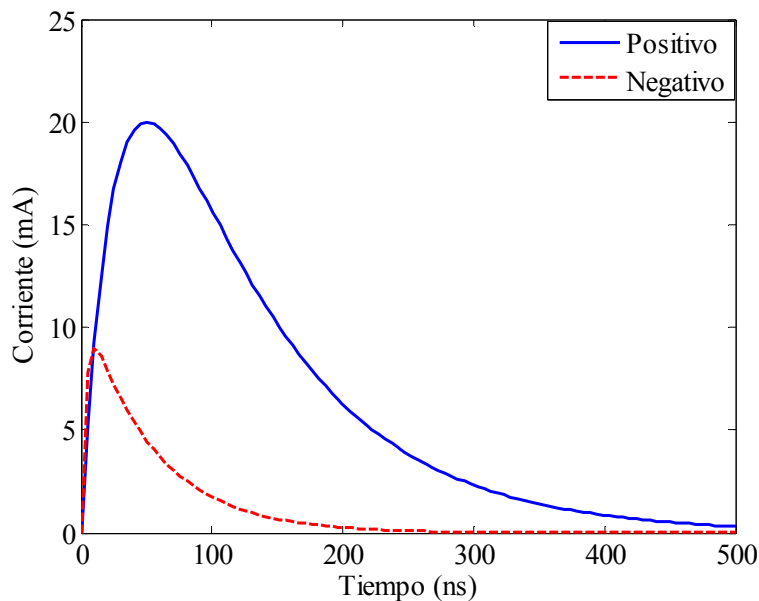


Fig. 3.1. Pulsos de corriente de corona positivo y negativo.

En consecuencia, la influencia de cada fuente de corona se observa sólo hasta una cierta distancia, la cual depende de las características de atenuación de la línea. De esta manera, la corriente circulante resultante en cualquier punto de la línea, estará formada por los pulsos producidos por las fuentes de corona distribuidas a lo largo del conductor, con amplitudes y espaciamiento en tiempo variando de forma aleatoria, viajando en los dos sentidos de la línea. Aunado a lo anterior, una fuente de corona en uno de los conductores de una línea multiconductora induce pulsos de corriente en todos los demás conductores [3].





3.3 EL CONCEPTO DE FUNCIÓN DE EXCITACIÓN.

El nivel de radiointerferencia en la vecindad de una línea de transmisión depende esencialmente de 2 factores:

1. La generación de corona en los conductores.
2. La propagación de las corrientes debidas a corona a través de la línea.

Desde los puntos de vista tanto teóricos como prácticos es de utilidad caracterizar la generación de corona por una *cantidad* que considere la naturaleza aleatoria y pulsante de las corrientes de corona. También es importante que dicha cantidad dependa solamente de la carga espacial y la distribución de campo eléctrico cercano al conductor, y no así de la configuración de la línea. Gary propuso una cantidad de este tipo a través del concepto de *función de excitación* [6]-[8].

Para un conductor sencillo (cilíndrico) localizado horizontalmente sobre el suelo, el movimiento de una carga φ generada por corona induce una corriente en el conductor. La corriente inducida puede calcularse empleando el teorema de Shockley – Ramo de la siguiente forma [3]:

$$J = \frac{C}{2\pi\epsilon_0} \frac{\varphi}{d_r} V_r \quad (3.2)$$

donde

J = Corriente inducida de corona.

C = Capacitancia p.u.l.

φ = carga generada por corona.

d_r = distancia radial del punto donde la carga φ esta localizada.

V_r = velocidad radial de la carga espacial.

La ecuación (3.2) puede reescribirse como:

$$J = \frac{C}{2\pi\epsilon_0} \Gamma \quad (3.3)$$





donde Γ es la función de excitación, dada por:

$$\Gamma = \frac{\varphi}{d_r} V_r \quad (3.4)$$

De (3.3) y (3.4) puede observarse que el término Γ es función únicamente del movimiento de carga espacial cercana al conductor y que la corriente inducida en el conductor puede considerarse dependiente de dos factores:

1. La capacitancia del conductor, la cual depende básicamente de su configuración geométrica.
2. La densidad y movimiento de carga espacial cercana al conductor, la cual depende solamente de la distribución de campo eléctrico en la vecindad del conductor.

En el contexto de radiointerferencia J representa los trenes de pulsos de corriente (aleatorios) inducidos en el conductor o, en el dominio de la frecuencia, el valor rms de la corriente a una frecuencia dada. La principal ventaja del concepto de función de excitación es que es completamente independiente de la geometría del conductor. Por lo tanto, Γ puede medirse en una geometría simple y después emplearse para predecir el desempeño de RI en una configuración práctica de línea de transmisión [3].

El nivel de RI depende de un buen número de parámetros; algunos están relacionados con la geometría de la línea como son: dimensiones de la línea, su posición en el espacio y la intensidad de campo eléctrico en la superficie de los conductores. No obstante, otros parámetros dependen del medio ambiente, por ejemplo, el estado en la superficie de los conductores y condiciones climáticas. La estimación de estos últimos parámetros es más complicada y debido a su existencia, el nivel de radiointerferencia en clima seco es inestable y fluctuante. Estas fluctuaciones combinadas con otras debidas a la variación de la tensión en las líneas, hacen muy difícil determinar exactamente los niveles de RI. Por lo anterior, la determinación de radiointerferencia en ambiente seco se realiza generalmente a través de estudios estadísticos [6].

Por otro lado, bajo condiciones de lluvia densa, el nivel de radiointerferencia se mantiene más estable. Esta propiedad nos permite considerar el valor de radiointerferencia bajo lluvia





densa como el valor característico de una línea. Además, este valor constituye en la práctica el máximo nivel de RI que la línea puede generar [6]. Por esta razón, varios grupos de investigación han derivado fórmulas empíricas para la función de excitación, basadas en un buen número de datos experimentales obtenidos en estudios desarrollados bajo condiciones de lluvia densa (1 a 20 mm/hr).

En 1992, Olsen y Schennum realizaron una comparación de algunos métodos para calcular los niveles de RI, y optimizaron las fórmulas para la función de excitación por medio de la adición de una constante para minimizar las diferencias entre cada una de ellas [11]. En la Tabla 3.2 se presentan algunas de las fórmulas para la función de excitación, dada en dB sobre $1\mu A/\sqrt{m}$, donde d es el diámetro del conductor en cm y g_m es el gradiente máximo en kV/cm (valor rms).

Tabla 3.2. Fórmulas empíricas para el cálculo de la función de excitación [11].

CIGRÉ (lluvia densa)	$\Gamma = -40.69 + 3.5g_m + 6d$
BPA (ambiente desfavorable, estable)	$\Gamma = 37.02 + 120 \log\left(\frac{g_m}{15}\right) + 40 \log\left(\frac{d}{4}\right)$
IREQ (lluvia densa)	$\Gamma = -93.03 + 92.42 \log(g_m) + 43.02 \log(d)$
EPRI (lluvia densa)	$\Gamma = 76.62 - \frac{580}{g_m} + 38 \log\left(\frac{d}{3.8}\right)$

3.4 ESTIMACIÓN DE LA RI.

La determinación del nivel de radiointerferencia es un parámetro de consideración en el diseño de líneas de alta tensión [20]. Sin embargo, existen variaciones en los criterios y métodos de cálculo de RI [2], [7], [24], [26]. Las normas más utilizadas en la medición de interferencia electromagnética son la NEMA y la CISPR de la IEC [36], [47]. A





continuación se consideran algunos aspectos que de alguna u otra forma influyen en la determinación de la RI [1].

3.4.1 Condiciones climáticas.

Para tomar en consideración adecuadamente la influencia de las condiciones climáticas en la generación de radiointerferencia, generalmente se realiza una medición y observación minuciosa de las fluctuaciones del clima durante un periodo de tiempo considerable (cuando menos un año). Los resultados obtenidos en algunos países, elaborados con base en histogramas, no pueden ser trasladados a otros con condiciones climáticas diferentes [1].

Los parámetros que suelen afectar estas observaciones son los siguientes:

- Variación de la tensión de la línea.
- Las condiciones meteorológicas pueden variar en un tramo de varias decenas de kilómetros. Un tramo de tal extensión contribuye en forma integral a la formación del nivel de RI.
- La superficie de los conductores de la línea se ve expuesta a una serie de factores, tanto de origen climático (nieve, hielo, rocío, etc.) como de naturaleza diversa (polvo, insectos, etc.).

A fin de facilitar el análisis, se han establecido algunos patrones de referencia. En el caso de la RI se han establecido dos patrones extremos: lluvia densa (heavy rain) y buen tiempo (fair weather). El nivel más alto de RI se observa usualmente durante lluvia densa (1 mm/hora) o nieve [1], [6].

3.4.2 Espectro de Frecuencias.

El espectro de frecuencias suministra la variación de la RI en función de la frecuencia hasta unos 10 MHz. La frecuencia de medición estipulada por NEMA es de 1 MHz, mientras que CISPR exige 500 kHz [2], [36], [37]. El espectro de frecuencias denota cierta dependencia de la polaridad de la descarga. Por ejemplo, en el rango de AM la descarga positiva ejerce un papel predominante, mientras que la descarga negativa tiene mayor influencia en la





transmisión de radio a frecuencia modulada (FM) y de video (TV). Otro aspecto de consideración es la atenuación de la propagación, que aumenta con la frecuencia, modificando el espectro de impulsos y reduciendo el ruido generado.

3.4.3 Geometría del conductor.

La mayoría de las líneas de alta tensión se caracterizan por utilizar conductores en haz. El número de subconductores por fase, el radio de cada uno de ellos y el radio del haz ejercen gran influencia sobre el nivel de RI y perfil lateral de la línea en estudio. Aunque aumentando el número de subconductores por fase disminuyen los efectos de la descarga corona, y por lo tanto también de RI, el comportamiento de la línea ante oscilaciones, carga de hielo, etc. puede empeorar [1].

3.4.4 Perfil Lateral de la Radiointerferencia (RI).

En la práctica es de gran importancia el conocimiento de la radiointerferencia a cierta distancia de la línea, lo que se suele denominar perfil lateral. El perfil se mide a una altura de 2 m sobre el nivel del suelo, aunque en algunos trabajos se calcula a nivel del suelo, hasta una distancia máxima de 200 m del conductor [2], [7], [24]. Lógicamente los niveles de RI van disminuyendo conforme la distancia a la línea aumente. Por otro lado, es importante eliminar cualquier fuente de perturbación así como tomar en consideración la proximidad a subestaciones, torres de alta tensión y cualquier variación brusca de terreno.

3.5 MEDICIÓN DE LA RI.

A fin de conocer si los niveles de radiointerferencia que genera una línea de transmisión son aceptables o afectan a dispositivos de comunicación en su vecindad, es necesario expresar el nivel de interferencia en términos cuantitativos, lo cual implica el uso de instrumentos de medición [2].





En general, los instrumentos utilizados en la medición de radiointerferencia ocasionada por líneas de transmisión constan de una antena acoplada a un detector de radio, el cual cubre el rango de la interferencia en cuestión. Con el objetivo de obtener un acoplamiento adecuado entre la terminación de la antena y la impedancia de medición contenida en el detector, se recurre en la práctica a acoplamientos especiales.

Para la medición de la radiointerferencia generada por líneas de transmisión se deben tomar en consideración aspectos como la localización de la medición, la calibración de los instrumentos y otras fuentes de ruido cercanas a la línea [2].

3.5.1 El Medidor de Radiointerferencia.

Los instrumentos utilizados en las mediciones de radiointerferencia, deben simular idealmente el dispositivo electromagnético que esta siendo interferido. En la Fig. 3.3 se muestra un diagrama a bloques de un medidor de radiointerferencia. Básicamente, el medidor consiste de un receptor de radio de alta calidad, la señal detectada que es procesada a través de varios bloques y un indicador de la medición. El receptor de radio es la parte del instrumento que es considerado como un filtro pasa banda con una ganancia constante para todas las frecuencias. El detector es un circuito rectificador que extrae los componentes de alta frecuencia de la señal de radio frecuencia modulada por el receptor [2], [3].

Los diferentes bloques por donde pasa la señal son diseñados de tal forma que se midan los valores pico, cuasi-pico (CP), promedio o valor rms de la salida del detector. Además de la indicación de radiointerferencia medida, estos instrumentos también proveen salidas de audio y otras salidas eléctricas a diferentes etapas del circuito. Utilizando antenas apropiadas el medidor de radiointerferencia puede ser utilizado como un voltmetro, ampermetro o medidor de intensidades de campos. Los instrumentos de medición modernos también cuentan con opciones de control por medio de computadoras y sistemas de adquisición de datos [3].





En el rango de frecuencias de 0.15 a 30 MHz, el cual abarca la banda de frecuencias de recepción de radio en Amplitud Modulada (AM), las mediciones de radiointerferencia generalmente se realizan utilizando una impedancia de conexión compuesta por una capacitancia de alta tensión en serie con un resistor entre el conductor y tierra, midiéndose la caída de tensión en un resistor de 50 Ω . Lo anterior también es comúnmente conocido como medición de voltaje de radiointerferencia (radio interference voltage, RIV). La corriente de interferencia puede ser obtenida fácilmente a partir del RIV medido.

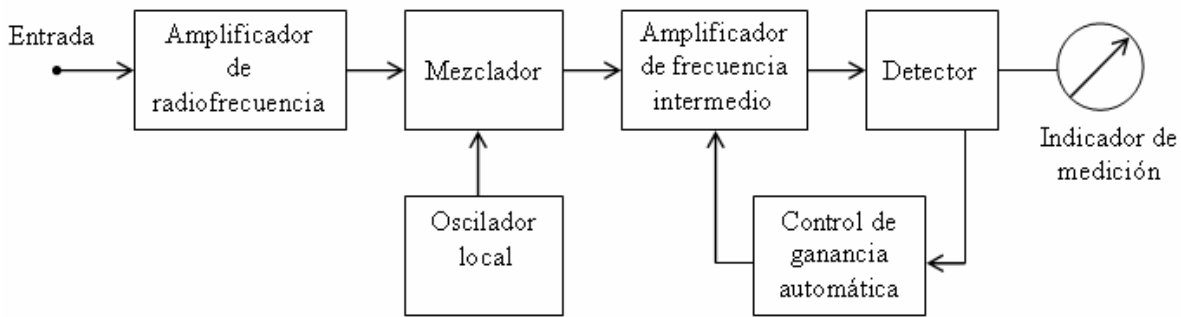


Fig. 3.2. Diagrama a bloques de un medidor de radiointerferencia [3].

3.5.2 Sistemas de Antena.

Para medir los campos de interferencia, se utilizan antenas que son colocadas dentro del campo que se desea medir. Las antenas de varilla (rod antennas) son usadas para medir las componentes de campo eléctrico del campo de radiointerferencia electromagnética, mientras que las antenas de cuadro (loop antennas) son utilizadas para la medición de las componentes de campo magnético [3].

La salida de tensión de la antena es proporcional a la intensidad del campo; el factor de antena relaciona ambas cantidades. Generalmente se tiene una impedancia considerable entre la antena y el medidor, pero se requiere un buen acoplamiento entre estos elementos para lograr obtener mejores lecturas a la frecuencia de medición o en un amplio rango de





frecuencias. El acoplamiento de la antena se obtiene en la forma de su construcción, y usualmente los fabricantes proveen curvas del factor de antena el cual incluye el acoplamiento. Cuando la antena es utilizada conforme a las instrucciones del fabricante, El campo de interferencia E está dado por [2]:

$$E = V_L + AF \text{ dB sobre } 1\mu\text{V/m} \quad (3.5)$$

donde V_L es la lectura de medición en dB sobre $1\mu\text{V/m}$ y AF es el factor de antena en dB sobre 1m^{-1} .

Debido a que existen diferentes tipos de antena, se tiene que considerar el tipo de ruido que se desea medir y la frecuencia de medición para seleccionar la antena adecuada. Las mediciones de RI en AM pueden realizarse con antenas verticales o en forma de lazo; para el caso de interferencia en la transmisión de señales de video (TVI), se recurre al uso de dipolos (150 a 200 MHz). En vista de que por encima de los 200 MHz se reduce drásticamente la sensibilidad de los dipolos, es necesario utilizar antenas bicónicas para frecuencias mayores a esta frecuencia [1].

3.6 INTERFERENCIA ELECTROMAGNÉTICA EN CORRIENTE DIRECTA.

La interferencia electromagnética generada por los sistemas de transmisión en corriente continua (HVDC, por sus siglas en inglés), puede ser hasta cierto grado extrapolada de la corriente alterna, considerando que la carga espacial que caracteriza a la primera no existe [1].

Mientras que en los sistemas de CA se tienen los efectos de cada polaridad en cada uno de los conductores, en CD un conductor siempre se expone a una descarga, positiva o negativa, mientras que el otro a la descarga opuesta. La excitación del fenómeno obedece a un incremento del gradiente eléctrico por encima de cierto valor crítico, al cual se ha definido como inyección del fenómeno.





Al igual que en CA, las descargas positivas contribuyen sustancialmente en la generación de interferencia, pues las negativas suelen tener una contribución insignificante. Esto quiere decir que en CD sólo el polo positivo genera radiointerferencia.

Utilizando las mismas técnicas y procedimientos de medición se observa en la práctica que las líneas de CD provocan menos problemas que las líneas de CA. Por lo tanto, el nivel de interferencia de una línea de CD puede estar 5 dB por encima del de una línea de CA, sin que genere gran perturbación [1].





CAPÍTULO IV

MÉTODO DE PREDICCIÓN DE PERFILES DE RADIOINTERFERENCIA

4.1 INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se describe un método para calcular los niveles de radiointerferencia generados por líneas de transmisión monofásicas y multiconductoras de alta tensión con corona. Dicho método está basado en el propuesto por Gary [7], sin embargo en esta tesis se incluyen dos importantes mejoras con el fin de obtener una mayor precisión en el cálculo de perfiles de RI: el empleo de descomposición modal para desacoplar el sistema multiconductor y la inclusión del efecto skin existente en el propio conductor y en el retorno por tierra, para las altas frecuencias en que se desarrolla el fenómeno de corona. Los resultados obtenidos son comparados con mediciones experimentales publicadas previamente por otros autores.

4.2 ANÁLISIS DE LA PROPAGACIÓN DE CORONA Y CÁLCULO DE RI.

El propósito del análisis de propagación es determinar las corrientes y tensiones en diferentes puntos a lo largo de la línea de transmisión relacionados con la generación de corona en los conductores, para finalmente calcular la intensidad de los campos eléctrico y magnético resultantes en la vecindad de la línea. A continuación se describen los métodos de cálculo para línea monofásica y multiconductora.





4.2.1 Línea Monofásica.

Se considera una línea de transmisión monofásica de longitud infinita con inyección de corriente por corona distribuida uniformemente por unidad de longitud y denotada por J . Para una longitud elemental de la línea puede emplearse el circuito mostrado en la Fig. 4.1. A partir de dicho circuito pueden obtenerse las siguientes ecuaciones:

$$-\frac{dV}{dz} = ZI \quad (4.1)$$

$$-\frac{dI}{dz} = YV - J \quad (4.2)$$

Los parámetros Z y Y son la impedancia serie y la admitancia en derivación por unidad de longitud de la línea, respectivamente, calculados a la misma frecuencia. Estos parámetros se obtienen a partir de la formulación descrita en [38] y presentada en el Apéndice A, la cual considera el efecto “skin” en conductores y en plano de tierra. Dado que la fuente de inyección de corona tiene la forma de un tren de pulsos, el valor de J , y en consecuencia de I y V , están dados en *rms* a una cierta frecuencia [3], [24]. También se tiene:

$$\gamma = \sqrt{ZY} = \alpha + j\beta \quad (4.3)$$

donde:

γ = constante de propagación.

α = constante de atenuación.

β = constante de fase.

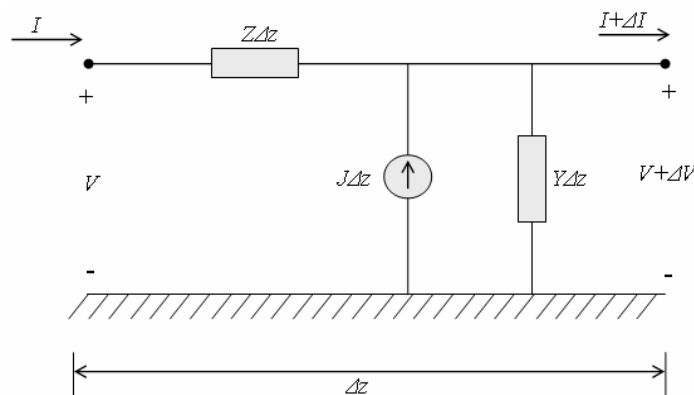


Fig. 4.1. Circuito por unidad de longitud de una línea aérea con inyecciones de corriente por corona.





A diferencia del método propuesto por Gary [7] en el cual las constantes de atenuación son presentadas como valores promedio para línea horizontal o en configuración triangular, en este método se obtienen a partir de (4.3). La constante de atenuación α tiene unidades de Nepers por metro (Np/m), mientras que la constante de fase β tiene unidades de radianes por metro (rad/m). Cuando la corriente J es inyectada en un punto de la línea de transmisión, ésta se divide y propaga igualmente en ambas direcciones. Por consiguiente, la corriente inducida I esta dada por:

$$I = \frac{J}{2\sqrt{\alpha}} \quad (4.4)$$

Donde la inyección de corriente por corona se obtiene con:

$$J = \frac{C}{2\pi\epsilon_0} \Gamma \quad (4.5)$$

La función de excitación Γ se obtiene mediante alguna de las fórmulas empíricas de la Tabla 3.2. La ecuación (4.4) es la solución requerida para las ecuaciones diferenciales definidas en (4.1) y (4.2).

La intensidad de campo magnético a una distancia horizontal x de la línea (a nivel del terreno) se calculan a partir de la corriente obtenida en (4.4). Empleando la ley de Ampere y el método de imágenes, el campo magnético es:

$$H_x = \frac{I}{2\pi} \left[\frac{h}{h^2 + x^2} + \frac{h + 2P}{(h + 2P)^2 + x^2} \right] \quad (4.6)$$

donde:

h = altura del conductor.

x = distancia del punto de medición.

P = profundidad de penetración, definida como

$$P = \sqrt{\frac{\rho_e}{j\omega\mu_e}} \quad (4.7)$$





donde ρ_e y μ_e son la resistividad y permeabilidad del terreno, respectivamente. Ahora, asumiendo la propagación de onda en modo cuasi-TEM (cuasi-transversal electromagnético), la intensidad del campo eléctrico se obtiene como:

$$E_y = Z_0 H_x \quad (4.8)$$

donde Z_0 es la impedancia de onda en espacio libre definida por

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 120\pi \quad (4.9)$$

De tal manera que:

$$E_y = 60I \left[\frac{h}{h^2 + x^2} + \frac{h + 2P}{(h + 2P)^2 + x^2} \right] \quad (4.10)$$

La intensidad de campo eléctrico debido a RI por corona, E_y , suele expresarse en $\mu\text{V/m}$ o más comúnmente en dB sobre $1\mu\text{V/m}$, de la siguiente forma:

$$E_y (dB) = 20 \log_{10} \frac{E_y (\mu\text{V} / \text{m})}{1\mu\text{V} / \text{m}} \quad (4.11)$$

4.2.2 Línea Multiconductora.

Para el caso de una línea multiconductora se tienen las siguientes ecuaciones:

$$-\frac{d\mathbf{V}}{dz} = \mathbf{Z}\mathbf{I} \quad (4.12)$$

$$-\frac{d\mathbf{I}}{dz} = \mathbf{Y}\mathbf{V} - \mathbf{J} \quad (4.13)$$

La intensidad de campo eléctrico o gradiente eléctrico promedio en la superficie de un conductor de radio r se calcula por medio del teorema de Gauss. Para un empaquetamiento de n_c conductores por fase:





$$g_{avg} = \frac{1}{n_c} \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (4.14)$$

donde:

q = carga

ϵ_0 = permitividad del vacío

r = radio de cada conductor

n_c = número de conductores por haz

La carga q es calculada a partir de:

$$\mathbf{q} = \mathbf{C}\mathbf{V} \quad (4.15)$$

Es importante considerar el desfaseamiento de las tensiones de cada una de las fases. Para el cálculo de la función de excitación Γ , se utilizan los valores de gradiente máximo, obtenidos para la i -ésima fase como [4]:

$$g_{i,max} = g_{i,avg} \left[1 + (n_c - 1) \frac{r_i}{R_i} \right] \quad (4.16)$$

donde R_i es el radio del haz. A fin de desacoplar el sistema trifásico, se aplica análisis modal para obtener las constantes de atenuación y corrientes en el dominio de modos. Se tiene que:

$$\lambda_V = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{Z} \mathbf{Y} \mathbf{M} \quad (4.17)$$

$$\lambda_I = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{Y} \mathbf{Z} \mathbf{N} \quad (4.18)$$

donde λ_V y \mathbf{M} son las matrices de valores propios (diagonal) y vectores propios del producto $\mathbf{Z}\mathbf{Y}$. De igual forma, λ_I y \mathbf{N} son las matrices de valores propios (diagonal) y vectores propios del producto $\mathbf{Y}\mathbf{Z}$. Además, $\lambda_V = \lambda_I = \lambda$ y $\mathbf{M} = (\mathbf{N}^t)^{-1}$. Las matrices de constantes de propagación modal Ψ y constantes de atenuación modal α_m se calculan de la siguiente forma:

$$\Psi = \sqrt{\lambda} \quad (4.19)$$

$$\alpha_m = \text{Re}\{\Psi\} \quad (4.20)$$





El vector de corrientes de inyección de corona, \mathbf{J} , se obtiene extendiendo (4.5) al caso multiconductor:

$$\mathbf{J} = \frac{\mathbf{C}}{2\pi\epsilon_0} \Gamma \quad (4.21)$$

En el dominio modal se tiene:

$$\mathbf{J}_m = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{J} \quad (4.22)$$

Empleando (4.20) y (4.22), los componentes modales de corriente en los conductores se calculan como:

$$\mathbf{I}_m = \begin{bmatrix} \frac{J_{m1}}{2\sqrt{\alpha_{m1}}} \\ \frac{J_{m2}}{2\sqrt{\alpha_{m2}}} \\ \vdots \\ \frac{J_{mn}}{2\sqrt{\alpha_{mn}}} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

donde $J_{m1}, J_{m2}, \dots, J_{mn}$ son los elementos del vector \mathbf{J}_m , mientras que $\alpha_{m1}, \alpha_{m1}, \dots, \alpha_{mn}$ son las constantes de atenuación modales, es decir, los elementos de la matriz diagonal $\boldsymbol{\alpha}_m$.

El flujo de corriente en todos los conductores debido a cada uno de los modos es:

$$\mathbf{I} = \mathbf{N} \text{diag}(\mathbf{I}_m) \quad (4.24)$$

donde $\text{diag}(\mathbf{I}_m)$ es una matriz diagonal formada por los elementos del vector \mathbf{I}_m . \mathbf{I} es entonces una matriz de $n \times n$, con sus renglones representando las fases de la línea y sus columnas representando los modos. La intensidad de campo magnético a una distancia horizontal x de la línea (a nivel del terreno) debido al k -ésimo modo se calcula como:

$$H_{x,k} = \sum_{i=1}^n \frac{I_{i,k}}{2\pi} \left[\frac{h_i}{h_i^2 + (x_i - x)^2} + \frac{h_i + 2P}{(h_i + 2P)^2 + (x_i - x)^2} \right] \quad (4.25)$$





donde:

$I_{i,k}$ = elemento del i -ésimo renglón y k -ésima columna de la matriz **I**

h_i = altura del i -ésimo conductor

x_i = distancia del i -ésimo conductor

x = punto de medición

La componente vertical correspondiente de intensidad de campo eléctrico, asumiendo nuevamente un modo de propagación cuasi-TEM es:

$$E_{y,k} = Z_0 H_{x,k} \quad (4.26)$$

Después de determinar la componente de intensidad de campo eléctrico debida a cada modo, el campo eléctrico total debido a todos los modos se calcula mediante una suma *rms*:

$$E_{y,total} = \sqrt{\sum_{k=1}^n |E_{y,k}|^2} \quad (4.27)$$

La ecuación anterior se justifica suponiendo que las velocidades de cada modo son iguales y por lo tanto las corrientes modales están en fase.

Por otro lado, cada fase de la línea genera un campo de interferencia en el periodo en el cual se originan las descargas corona (*streamers*) positivas, es decir, en los valores cercanos al pico positivo de la tensión senoidal. Por consiguiente, una línea trifásica genera tres campos de interferencia desplazados en el tiempo. Si se coloca un instrumento de medición cercano a la línea, este medirá el nivel de RI total siguiendo el criterio establecido por el CISPR [36], el cual indica que si uno de los campos es más alto que los demás por más de 3dB, el instrumento de medición sólo tomara en cuenta dicho campo. De lo contrario, se tomaran los dos campos más altos y se aplicará la siguiente ecuación para obtener el campo total:

$$E_{(CISPR)} = \frac{E_1 + E_2}{2} + 1.5dB \quad (4.28)$$





En la Fig. 4.2 se presenta un diagrama a bloques mostrando la secuencia de pasos del método de cálculo descrito, el cual se implementó en un programa de cómputo utilizando el lenguaje de programación MATLAB.

A. Cálculo de parámetros.

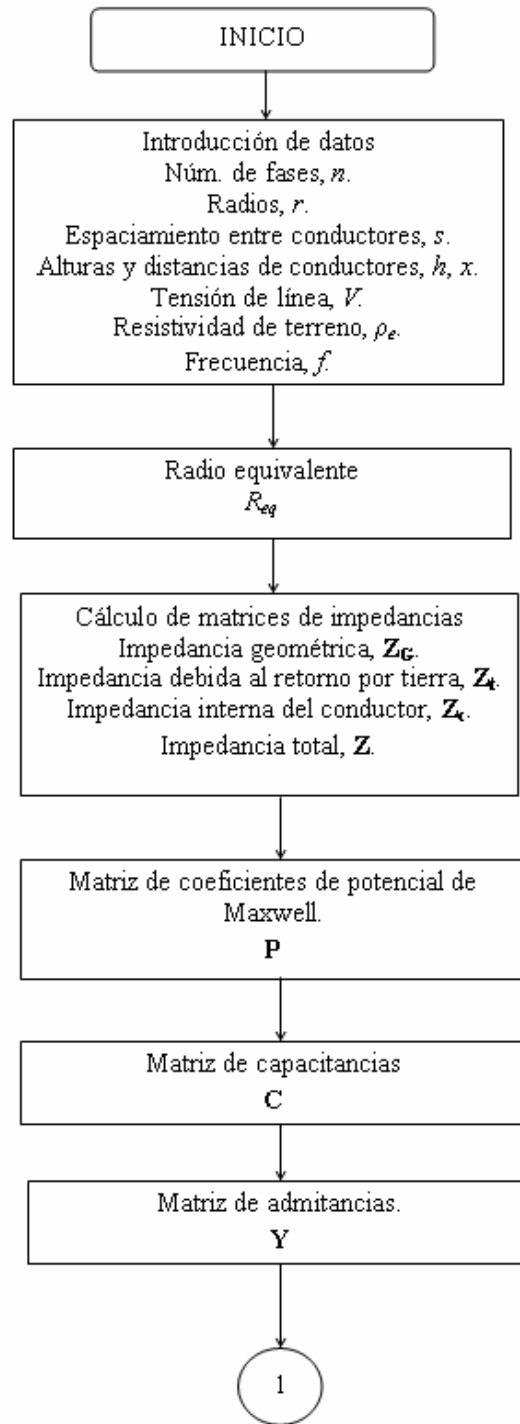


Fig. 4.2. Diagrama a bloques del método de predicción de perfiles de RI.



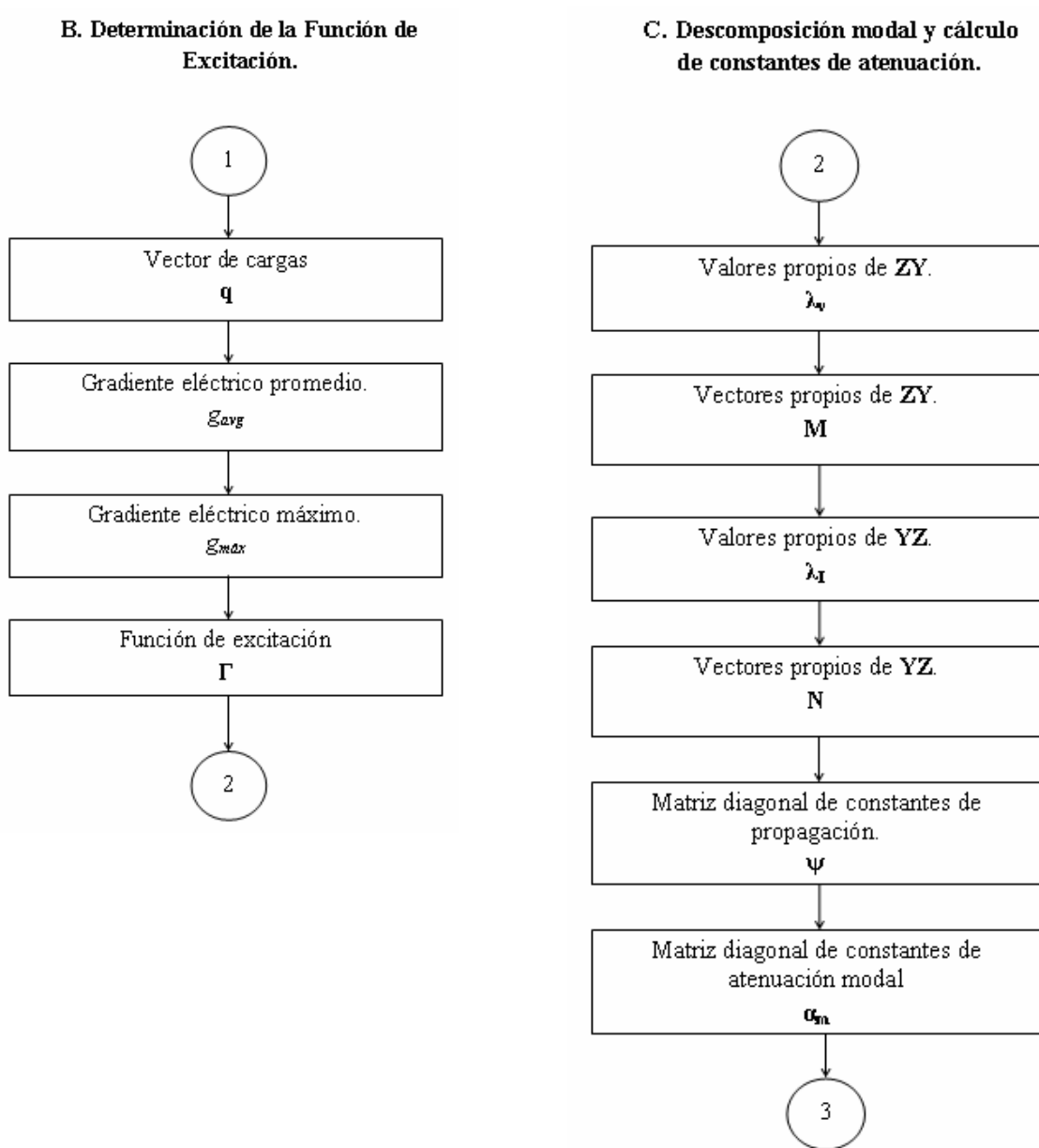


Fig. 4.2. Diagrama a bloques del método de predicción de perfiles de RI (continuación).





D. Determinación de perfiles de RI para cada fase con funciones de excitación unitarias.

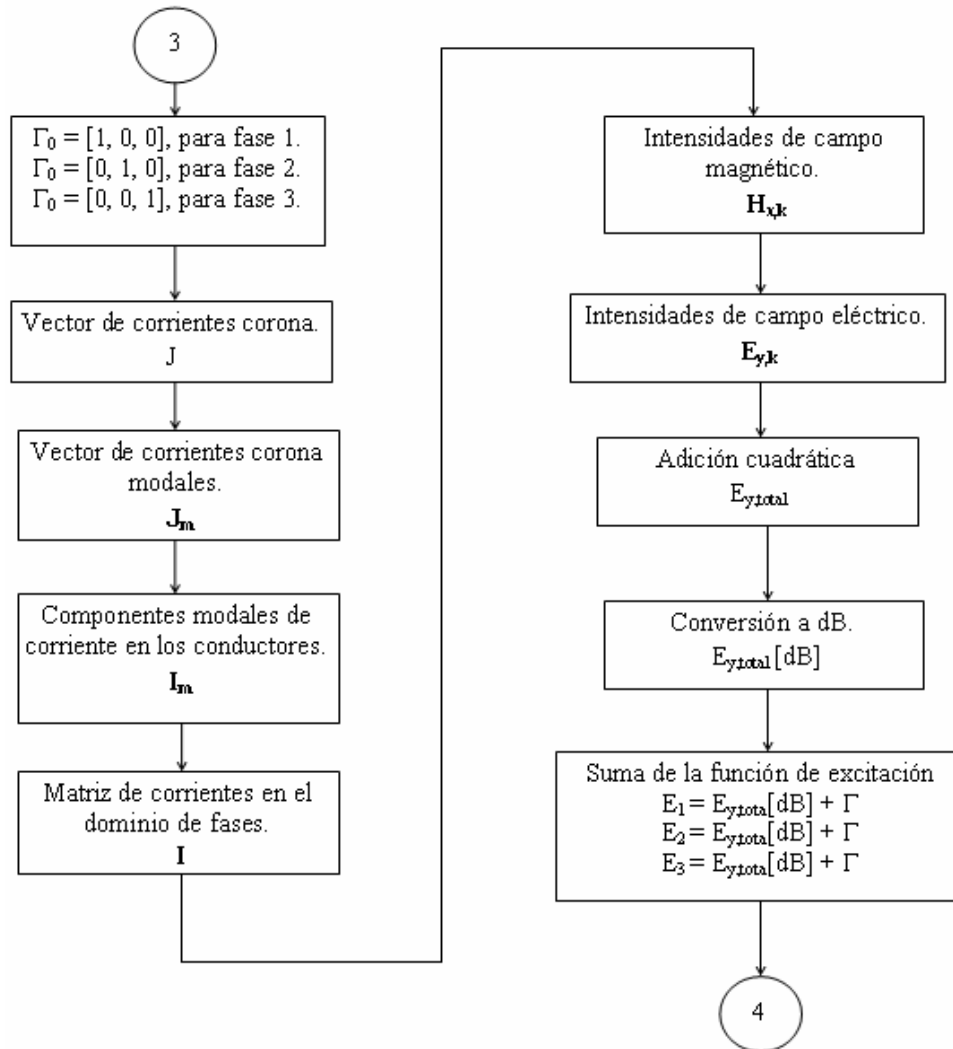


Fig. 4.2. Diagrama a bloques del método de predicción de perfiles de RI (continuación).





E. Cálculo del campo total de Radiointerferencia.

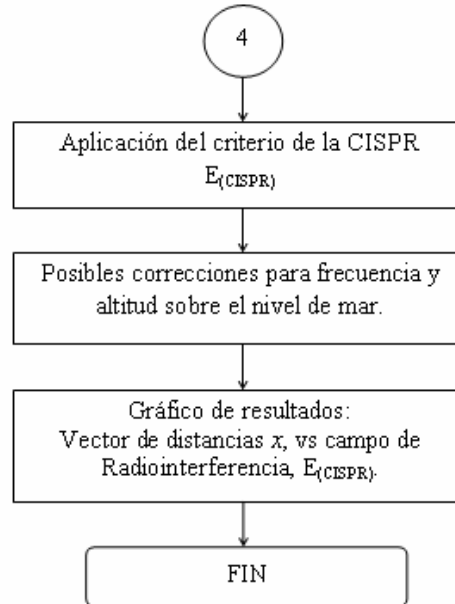


Fig. 4.2. Diagrama a bloques del método de predicción de perfiles de RI (continuación).

4.3 CASOS DE APLICACIÓN.

En esta sección se presentan algunos ejemplos de aplicación en líneas de transmisión trifásicas de alta tensión, en los cuales se determinan los perfiles de RI en dB sobre $1\mu\text{V/m}$, en un rango de distancias de 0 a 150 m sobre el nivel de suelo. Los cálculos son realizados a una frecuencia de 500 kHz, considerando una resistividad del terreno de $100\ \Omega\cdot\text{m}$. Se simuló la aparición de corona en cada una de las fases por separado utilizando como función de excitación la fórmula optimizada de la Boneville Power Administration (BPA), segunda de la Tabla 3.2. Para obtener el nivel de RI total que mediría un instrumento de medición que considera valores cuasi-pico (CP), se aplicó el criterio del CISPR utilizando la ecuación (4.28). Los métodos 1 y 2 señalados en las figuras se describen a continuación:





Método 1: Propuesto por Gary [7]. Las constantes de atenuación son presentadas como valores promedio en tablas únicamente para dos casos: línea horizontal y en configuración triangular. Por otro lado, para desacoplar el sistema trifásico se utiliza la matriz de modos de Clarke, la cual está definida en general para sistemas balanceados.

Método 2: Descrito en este capítulo. Las constantes de atenuación se calculan directamente de los parámetros eléctricos de la línea, en los cuales se considera el efecto “skin” en conductores y el plano del terreno. El sistema se desacopla aplicando análisis modal, de tal manera que la precisión no se ve afectada en el análisis de sistemas con configuraciones geométricas arbitrarias.

Para los casos de estudio que se presentan, se utilizaron diferentes configuraciones de líneas trifásicas que se extrajeron de [2]. Para efectos de comparación, se separaron los ejemplos en dos grupos de configuraciones: por un lado se analizan líneas en configuración horizontal y triangular, y por otro, líneas en configuración vertical. Además de las gráficas obtenidas, también se muestran las constantes de atenuación obtenidas con el método de Gary (método 1) y con el método 2, presentado en este trabajo.

4.3.1 Líneas en configuración Horizontal y Triangular.

Ejemplo 1

En este primer ejemplo se analiza el caso de una línea de transmisión trifásica de 380 kV, en configuración triangular formada por 2 conductores por fase, los subconductores tienen un radio de 0.0132 m y el radio del haz es de 0.2 m. La configuración geométrica de la línea se muestra en la Fig. 4.3.

Se analizan los resultados obtenidos y se comparan con los presentados en [7]. En la Fig. 4.4 se muestra el perfil de RI total en donde se observa que éste disminuye conforme la distancia lateral de la línea aumenta. También se puede apreciar que el resultado de los dos





métodos tienden a diferir para distancias laterales mayores, ya que a una distancia de 150 m la diferencia entre ambos métodos es de 5 dB, además sus constantes de atenuación modales también muestran gran diferencia como se observa en la Tabla 4.1.

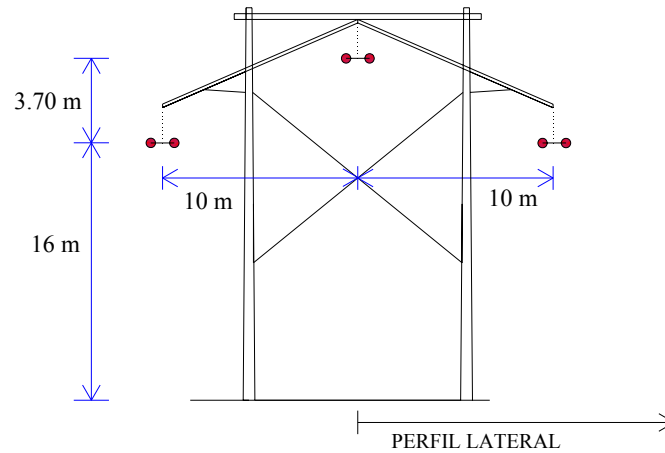


Fig. 4.3. Características geométricas de la línea trifásica de 380 kV.

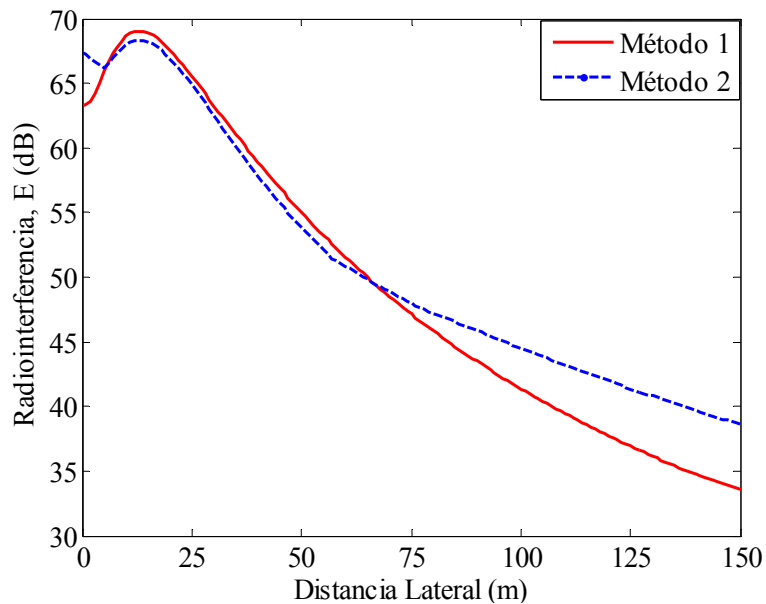


Fig. 4.4. Perfil de RI total de la línea trifásica de 380 kV.





Tabla 4.1. Constantes de atenuación para el ejemplo 1.

Modo	Constantes de atenuación α (Np/m)	
	Método 1	Método 2
1	21.5×10^{-6}	2.9×10^{-6}
2	21.5×10^{-6}	36.5×10^{-6}
3	342×10^{-6}	295.5×10^{-6}

Ejemplo 2

Para este ejemplo se presenta el caso de una línea de transmisión trifásica de 400 kV formada por 2 conductores por fase, con un radio de cada subconductor de 0.016 m y radio de haz de 0.225 m. La configuración geométrica de la línea se muestra en la Fig. 4.5.

Los resultados de la simulación se presentan en la Fig. 4.6, en donde se observa que inicialmente la diferencia entre los métodos es de alrededor de 5 dB, ya que con el método 1 se tiene un nivel de RI de 58 dB y con el método 2 un nivel de 63 dB. Sin embargo, conforme aumenta la distancia lateral el nivel de radiointerferencia y la diferencia entre ambos métodos van disminuyendo. En la Tabla 4.2 se muestran las constantes de atenuación utilizadas por los métodos 1 y 2, para cada uno de los modos.

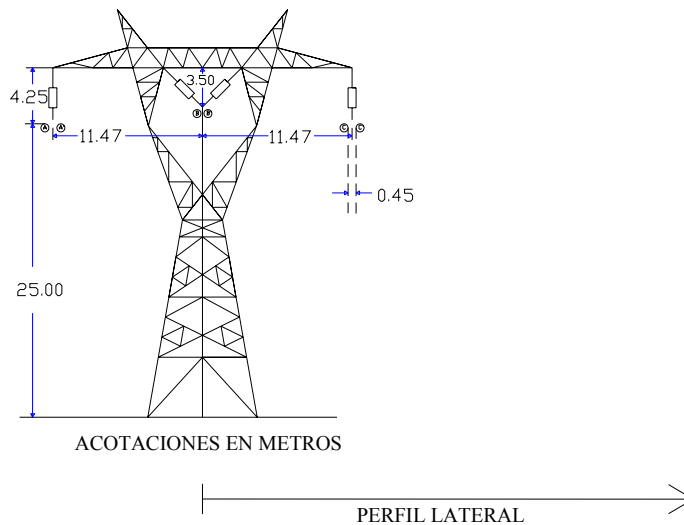


Fig. 4.5. Características geométricas de la línea trifásica de 400 kV.



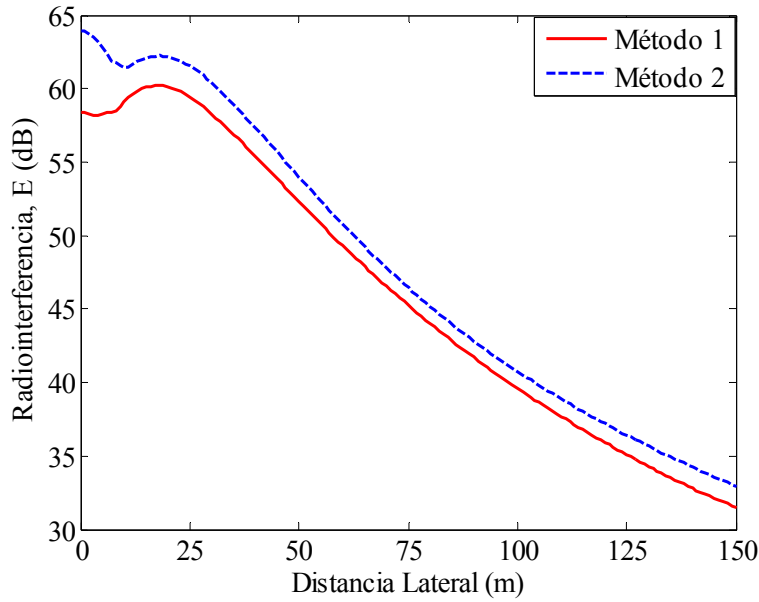


Fig. 4.6. Perfil de RI total de la línea trifásica de 400 kV.

Tabla 4.2. Constantes de atenuación para el ejemplo 2.

Modo	Constantes de atenuación α (Np/m)	
	Método 1	Método 2
1	21.5×10^{-6}	2.5×10^{-6}
2	21.5×10^{-6}	17.8×10^{-6}
3	342×10^{-6}	201.7×10^{-6}

Ejemplo 3

Se presenta ahora el caso de una línea de transmisión trifásica de 750 kV, en configuración horizontal, formada por 4 conductores por fase con un radio de subconductor de 0.0155 m y radio de haz de 0.212 m. La configuración geométrica de la línea se muestra en la Fig. 4.7.

Los resultados obtenidos se presentan en la Fig. 4.8, en donde se observa que el nivel máximo de RI es de 79 dB y la diferencia entre ambos métodos para todo el perfil es de alrededor de 2 dB. En la Tabla 4.3 aparecen las constantes de atenuación modales para este ejemplo.



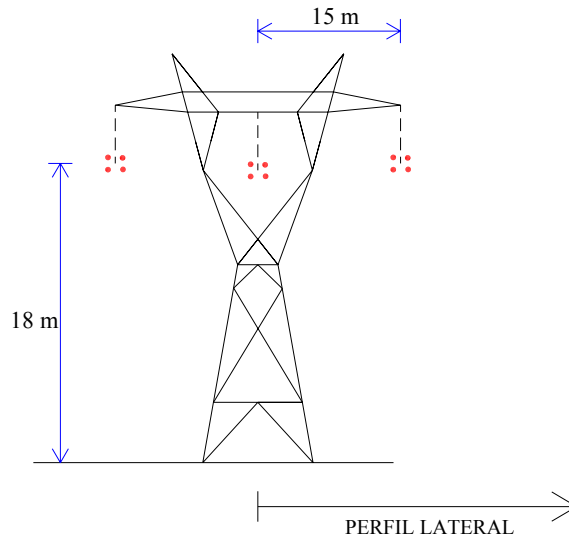


Fig. 4.7. Características geométricas de la línea trifásica de 750 kV.

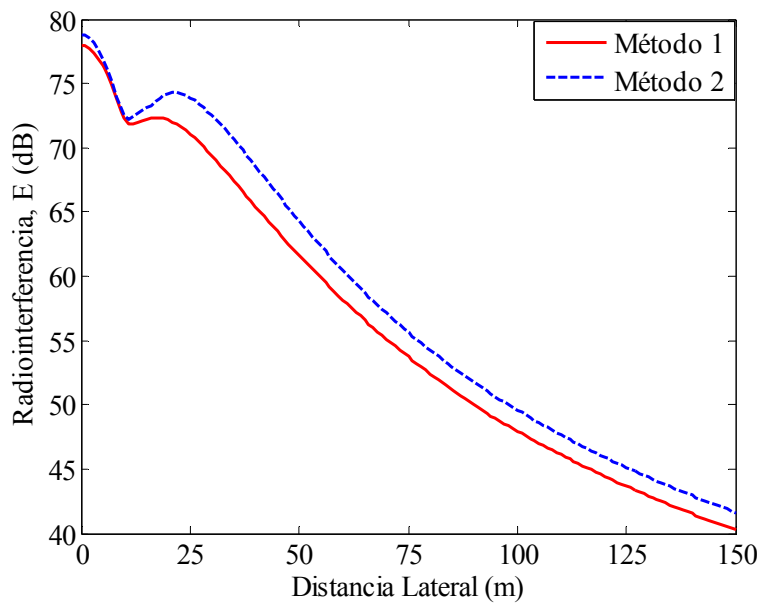


Fig. 4.8. Perfil de RI total de la línea trifásica de 750 kV.

Tabla 4.3. Constantes de atenuación para el ejemplo 3.

Modo	Constantes de atenuación α (Np/m)	
	Método 1	Método 2
1	11.1×10^{-6}	6.9×10^{-6}
2	54×10^{-6}	55.3×10^{-6}
3	342×10^{-6}	313.2×10^{-6}





4.3.2 Líneas en configuración Vertical.

Ejemplo 4

Ahora se consideran algunas configuraciones de tipo vertical. En este caso se presenta una línea de transmisión trifásica de 500 kV formada por 3 conductores por fase, con un radio de cada subconductor de 0.0191 m y radio de haz de 0.2286 m. La configuración geométrica de la línea se muestra en la Fig. 4.9.

Los resultados de la simulación se presentan en la Fig. 4.10 en donde se aprecia una gran diferencia entre ambos métodos. Inicialmente se observa una diferencia de 4 dB, pero conforme aumenta la distancia lateral la diferencia también se hace más notable. Para 150 m, con el método 1 se tiene un nivel de RI de 33 dB y con el método 2 se tiene 44 dB, es decir una diferencia de 11 dB. De igual forma, las constantes de atenuación muestran gran diferencia como se aprecia en la Tabla 4.4.

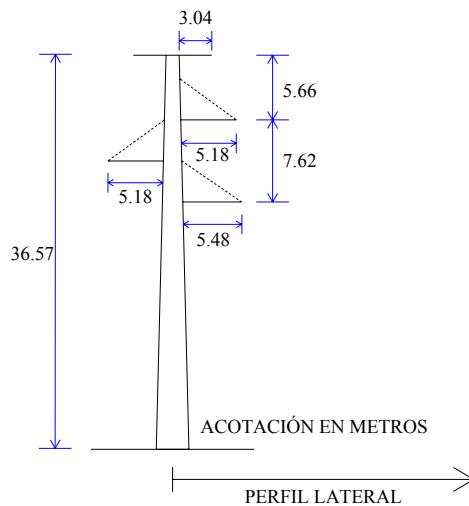


Fig. 4.9. Características geométricas de una línea trifásica de 500 kV.



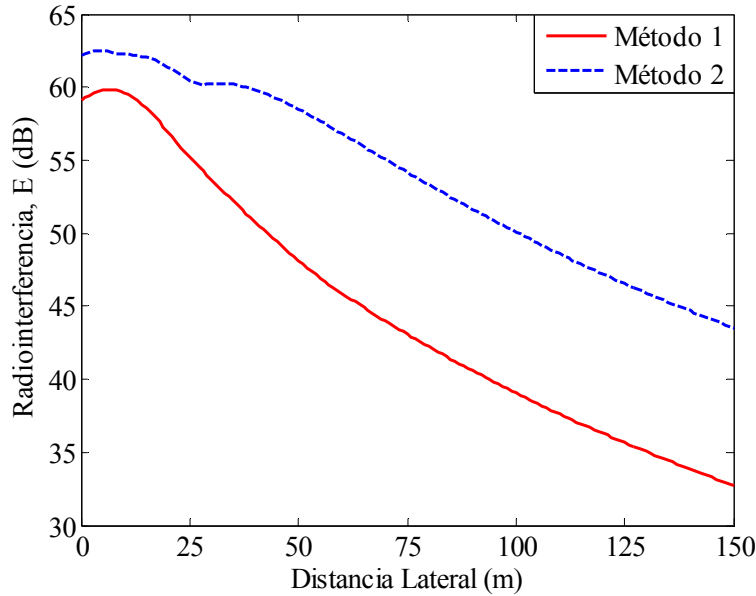


Fig. 4.10. Perfil de RI total de la línea trifásica de 500 kV.

Tabla 4.4. Constantes de atenuación para el ejemplo 4.

Modo	Constantes de atenuación α (Np/m)	
	Método 1	Método 2
1	21.5×10^{-6}	6.6×10^{-6}
2	21.5×10^{-6}	2.4×10^{-6}
3	342×10^{-6}	191.3×10^{-6}

Ejemplo 5

Para este ejemplo se analiza una línea de transmisión trifásica de 230 kV formada por 1 conductor por fase, con un radio de 0.012 m. La configuración geométrica de la línea se muestra en la Fig. 4.11. Aunque la línea consta de un circuito doble, sólo se consideró que uno de ellos estaba energizado.

Los resultados de la Fig. 4.12 nos muestran también una gran diferencia entre los métodos, para una distancia de 0 m se tienen 4 dB de diferencia y para 150 m se tienen 8 dB. En la Tabla 4.5 se observan las constantes de atenuación modales.



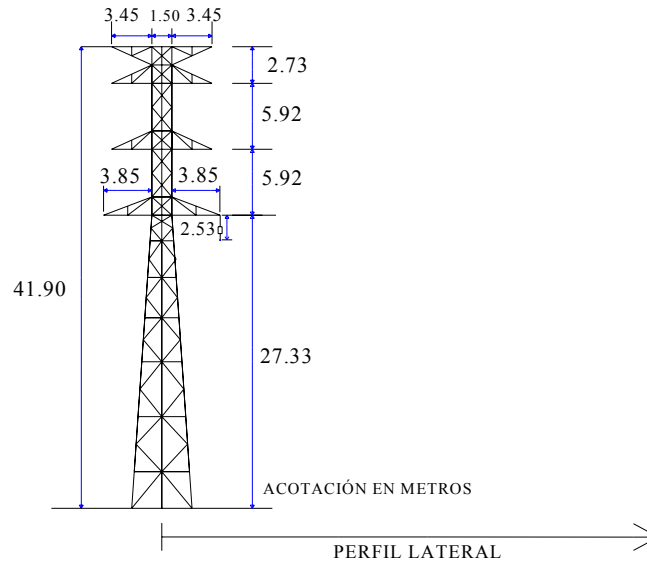


Fig. 4.11. Características geométricas de la línea trifásica de 230 kV.

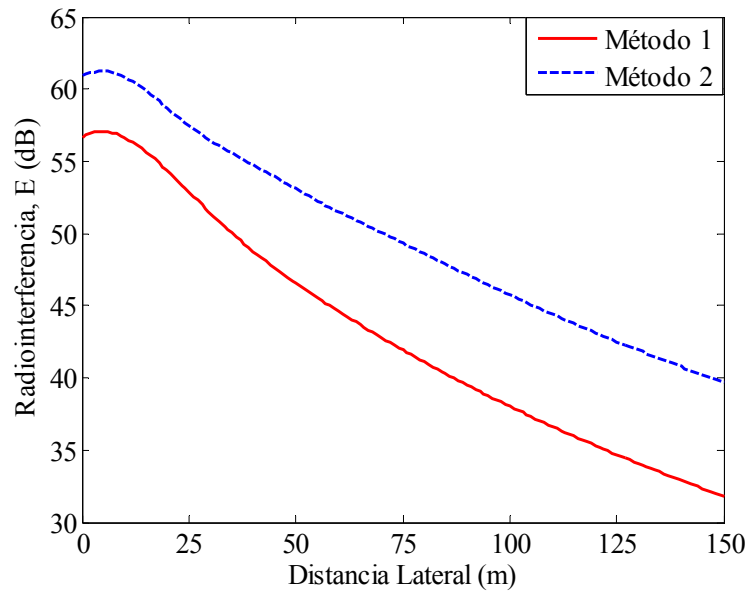


Fig. 4.12. Perfil de RI total de la línea trifásica de 230 kV.

Tabla 4.5. Constantes de atenuación para el ejemplo 5.

Modo	Constantes de atenuación α (Np/m)	
	Método 1	Método 2
1	21.5×10^{-6}	4.3×10^{-6}
2	21.5×10^{-6}	4.9×10^{-6}
3	342×10^{-6}	131.3×10^{-6}





Ejemplo 6

El último ejemplo consta de una línea de transmisión trifásica de 345 kV formada por 2 conductores por fase, con un radio de 0.0148 m y radio de haz de 0.2286 m. La configuración geométrica de la línea se muestra en la Fig. 4.13. Los resultados se presentan en la Fig. 4.14 y nuevamente se observa una gran diferencia entre métodos, la cual va creciendo conforme aumenta la distancia lateral de la línea; además, las constantes de atenuación modal que se observan en la Tabla 4.6 muestran gran diferencia.

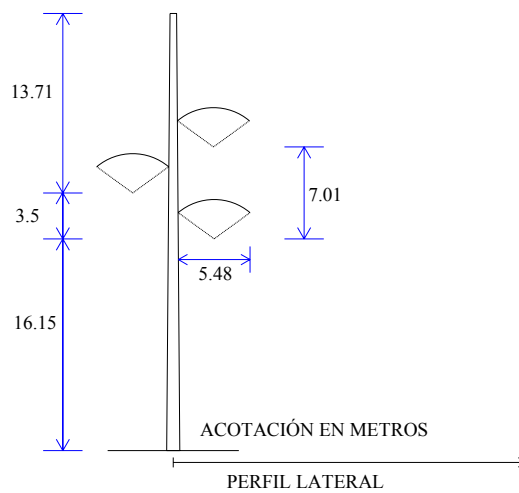


Fig. 4.13. Características geométricas de la línea trifásica de 345 kV.

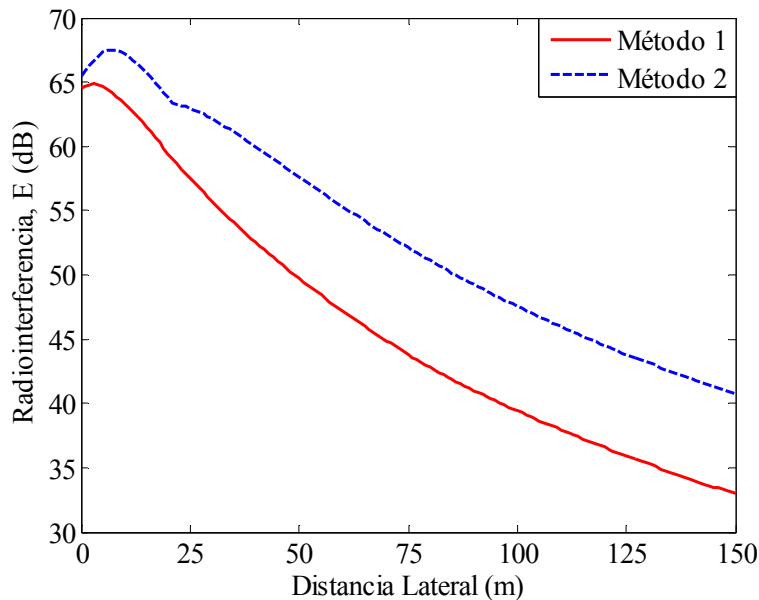


Fig. 4.14. Perfil Lateral de RI total de la línea trifásica de 345 kV.





Tabla 4.6. Constantes de atenuación para el ejemplo 6.

Modo	Constantes de atenuación α (Np/m)	
	Método 1	Método 2
1	21.5×10^{-6}	6.1×10^{-6}
2	21.5×10^{-6}	4.1×10^{-6}
3	342×10^{-6}	244.4×10^{-6}

4.4 COMPARACIÓN CON RESULTADOS EXPERIMENTALES.

En esta sección se presentan comparaciones entre los resultados obtenidos con el método presentado en este trabajo y resultados de mediciones de RI publicados en [11]. En las Tablas 4.7 y 4.8 se reproducen los datos de las líneas de transmisión en las cuales se efectuaron las mediciones en dicha referencia. Las 5 líneas se encuentran a diferentes alturas sobre el nivel de mar, por lo cual se realizó una corrección de +1 dB por cada 300 m como se indica en [11]. También se realizaron correcciones en el caso de mediciones efectuadas a frecuencias diferentes de 500 kHz, utilizando la Fig. 2 de [7]. En la Tabla 4.9 y Fig. 4.15 se presentan los resultados de las mediciones realizadas en clima estable desfavorable y los obtenidos con los métodos 1 y 2. En la mayoría de los casos, con el método 2 se obtienen resultados más cercanos a las mediciones, lo cual evidencia que las modificaciones realizadas al método de Gary resultan en mejores predicciones de RI.

Tabla 4.7. Datos geométricos de las líneas de estudio [11].

Línea	Altitud (m)	Tensión (kV)	Fases	Diámetro del conductor (mm)	Número de subconductores	Espaciamiento entre subconductores (cm)	Distancia horizontal de conductores (m)			Altura de conductores (m)		
							A	B	C	A	B	C
1	350	400	3	50	1	0	-9.6	0	9.6	14	14	14
2	50	400	3	31.7	2	45	-12	0	12	14	14	14
3	60	735	3	35.1	4	45.7	-15.2	0	15.2	17.1	17.1	17.1
4	250	760	3	29.6	4	45.7	-13.7	0	13.7	19.8	19.8	19.8
5	50	735	3	30.5	4	45.7	-13.7	0	13.7	27.4	27.4	27.4





Tabla 4.8. Gradientes de campo eléctrico y parámetros utilizados en las mediciones [11].

Línea	Gradiente eléctrico en conductores (kV/cm)			Altura de la antena (m)	Frecuencia (MHz)	Resistividad de terreno ($\Omega \cdot m$)	Distancia de medición (m)	Detector
	Fase A	Fase B	Fase C					
1	15.07	15.93	15.07	3	0.5	250	24.6	CISPR
2	15.42	16.21	15.42	2	0.5	250	27.0	CISPR
3	16.19	17.29	16.19	2	1	250	0	ANSI
4	19.50	20.95	19.50	5	1.025	125	28.7	ANSI
5	18.37	19.80	18.37	1	1	250	287	ANSI

Tabla 4.9. Comparación entre mediciones y valores calculados de RI.

Línea	Medición (dB)	Método 1 (dB)	Método 2 (dB)
1	73	67.65	70.72
2	66	59.92	62.02
3	73	70.38	69.84
4	70.5	66.44	70.66
5	68	60.52	65.1

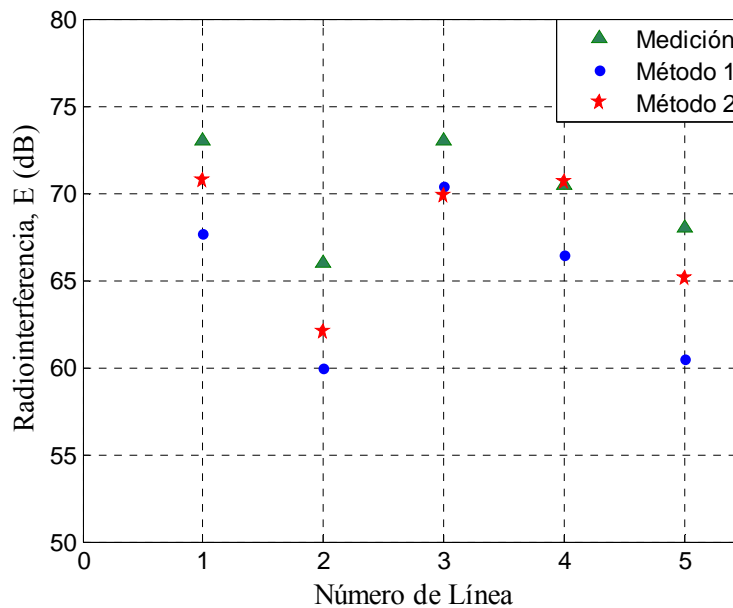


Fig. 4.15. Comparación de resultados con mediciones.





4.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Analizando los ejemplos de aplicación de la sección 4.3, se observó que en el caso de líneas en configuración horizontal y triangular los resultados de los métodos 1 y 2 son muy similares, presentándose en algunos casos las discrepancias más significativas en los primeros 5 metros de medición con 3 a 5 dB de diferencia (Ejemplos 1 y 2), y a distancias mayores a 100 m con 5 dB de diferencia (Ejemplo 1). Aún así, las diferencias de los resultados de ambos métodos para el resto del perfil de RI de cada una de las líneas son menores a 2 dB. Sin embargo, para el caso de líneas en configuración vertical, los resultados de los métodos 1 y 2 presentan discrepancias mayores las cuales se acrecentan conforme la distancia lateral de la línea aumente, llegándose a obtener diferencias del orden de 8 a 11 dB en la mayor parte del perfil de las líneas.

Las grandes diferencias en los perfiles de RI para líneas en configuración vertical pueden deberse a que en algunas secciones del método de Gary (método 1), los cálculos están enfocados a líneas balanceadas. Por ejemplo, el procedimiento utilizado para desacoplar el sistema trifásico es mediante el empleo de la matriz de modos de Clarke, y las constantes de atenuación se toman como valores promedio para líneas en configuración horizontal y triangular, razón por la cual los resultados de los métodos 1 y 2 para este tipo de líneas tuvieron sólo pequeñas diferencias.

La comparación de los resultados de los métodos 1 y 2 con mediciones experimentales, muestran que las adecuaciones realizadas al método de Gary conducen a mejores predicciones de radiointerferencia, ya que para la mayoría de los casos con el método 2 se obtuvieron resultados más cercanos a los valores medidos, teniéndose una exactitud de 3 a 4.5 dB sobre el método 1. No obstante, en el caso de la línea 3, el método 1 se acercó un poco más a la medición, con 0.54 dB sobre el método 2. Lo anterior puede deberse a que esta fue la única medición que se efectuó a 0 m de distancia, es decir, justo debajo de la línea, y como se vio en los ejemplos de aplicación, para líneas en configuración horizontal como es el caso de la línea 3, las diferencias más significativas se presentan en los primeros metros del perfil.





También hay que tomar en cuenta que se pueden tener fuentes error en los factores de corrección para la altitud sobre el nivel de mar y para frecuencias de medición diferentes a 500 kHz. Aunado a lo anterior, se utilizaron diferentes tipos de instrumentos y antenas en cada una de las mediciones [8], [11].

De cualquier forma, la diferencia de los resultados obtenidos con ambos metodos para la línea 3 es mínima (0.54 dB), y las comparaciones con las otras 4 mediciones indican que los niveles de RI obtenidos con el método 2 son más exactos que los obtenidos con el método 1.





CAPÍTULO V

EVALUACIÓN DE TÉCNICAS DE ATENUACIÓN DE RI

5.1 INTRODUCCIÓN.

Como se ha visto en los capítulos anteriores, la intensidad del campo eléctrico en la superficie de los conductores es el factor más importante en la ocurrencia y características de la descarga corona. Por lo tanto, al buscar minimizar los niveles de RI por corona, debemos orientarnos en la reducción de dicho campo, lo cual a su vez puede conseguirse al aumentar el radio de los conductores o el radio equivalente de un haz de subconductores.

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos para los perfiles de RI de diferentes líneas, empleando el método descrito en el Capítulo IV, al aumentar el espaciamiento entre subconductores de un haz, lo cual a su vez aumentará el radio equivalente del mismo. También se obtuvieron resultados con respecto a la variación en el número de subconductores por haz; generalmente con el aumento del número de subconductores, se logran atenuar los niveles de RI generados por la línea; sin embargo, la distancia entre los subconductores debe ser seleccionada adecuadamente para obtener la máxima reducción posible, como se mostrara más adelante.

Como herramienta auxiliar, se empleó el programa de simulación de campos electromagnéticos COMSOL Multiphysics[®], para analizar la distribución e intensidad del campo eléctrico ante distintas configuraciones simples de conductores energizados [45], [46].





5.2 SELECCIÓN DE CONDUCTORES.

Las líneas de transmisión tienen el propósito de transportar la energía eléctrica entre dos puntos de una manera segura y confiable. Se puede considerar a los conductores como la parte más importante de una línea de transmisión, ya que son éstos los que conducen la energía eléctrica. Además, la compra de los conductores corresponde al 30 – 50 % del total de la inversión para la instalación de una línea de transmisión [4].

En la construcción de líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica en alta tensión, se utilizan casi exclusivamente conductores metálicos desnudos, que se obtienen mediante cableado de hilos metálicos (alambres) alrededor de un hilo central. Los metales utilizados en la construcción de líneas aéreas deben poseer tres características principales:

- 1) Una baja resistencia eléctrica, y en consecuencia bajas pérdidas por efecto Joule.
- 2) Elevada resistencia mecánica, de tal manera que se tenga una elevada resistencia a los esfuerzos permanentes o accidentales.
- 3) Costo limitado.

En los inicios de la transmisión de potencia eléctrica los conductores eran principalmente de cobre; no obstante, estos han sido reemplazados por conductores de aluminio para líneas aéreas debido a su menor costo y ligereza con respecto a los de cobre para un mismo valor de resistencia. Otra ventaja es el hecho de que el conductor de aluminio tenga mayor diámetro que el de cobre con la misma resistencia, ya que con un diámetro mayor, las líneas de flujo eléctrico que se originan en el conductor se encuentran más separadas en su superficie para la misma tensión. Con lo anterior se logra tener un menor gradiente eléctrico en la superficie del conductor [39].

Los símbolos que identifican a los diferentes tipos de conductores de aluminio son los siguientes:





AAC	Todos los conductores de aluminio
AAAC	Todos los conductores de aleación de aluminio
ACSR	Conductores de aluminio con alma de acero
ACAR	Conductores de aluminio con alma de aleación

Un tipo de conductor conocido como *ACSR expandido*, tiene un relleno de papel que separa los hilos de acero del interior de los de aluminio que están en el exterior. El papel le da un diámetro más grande, con lo cual se pueden reducir las posibilidades de aparición de corona [39], [40].

5.3 CONDUCTORES EN HAZ.

En los inicios de los sistemas de transmisión de alta tensión, se reconoció que el campo eléctrico en la superficie de los conductores era un factor importante en la generación de corona, y debido a que la intensidad de dicho campo decrece en proporción inversa al radio del conductor, se empezó a incrementar el diámetro de los conductores. Sin embargo, esta era una solución poco económica ya que la cantidad de material necesaria para la construcción de los conductores era mayor. Otra opción fue utilizar conductores huecos, pero no se tuvo gran éxito debido a las complicaciones en la manufactura y mantenimiento de los mismos [3].

La solución que ha permitido utilizar tensiones de transmisión cada día más elevadas fue la introducción de conductores en haz. En 1930, Markt y Mengele obtuvieron la patente para esta alternativa. Ellos describieron las ventajas de utilizar varios conductores por fase tales como lograr que se presenten menores gradientes de potencial en la superficie de los conductores, así como incrementar la capacidad de transmisión de la línea.

En la actualidad, la mayoría de las líneas de transmisión utilizan conductores en haz; de hecho, para tensiones de transmisión mayores a 420 kV no es factible utilizar un solo conductor por fase [4].





En la Fig. 5.1 se ilustra un haz de 6 conductores. Las características principales de un haz son el número de subconductores n_c , su radio r , radio del haz R , radio equivalente R_{eq} , los valores promedio, máximo y mínimo del gradiente eléctrico superficial, E_a , $E_{máx}$, $E_{mín}$ respectivamente, y la separación entre subconductores adyacentes dada por:

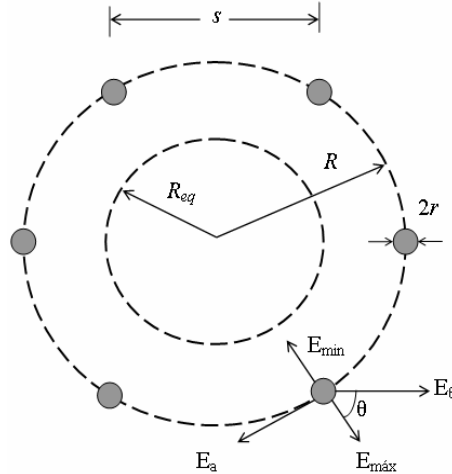


Fig. 5.1. Haz de seis subconductores.

$$s = 2R \operatorname{sen} \left(\frac{\pi}{n_c} \right) \quad (5.1)$$

El radio equivalente corresponde al radio de un cilindro imaginario que tendría la misma capacitancia del haz verdadero respecto a todos los subconductores y está dado por:

$$R_{eq} = \sqrt[n_c]{n_c r R^{(n-1)}} \quad (5.2)$$

Para la determinación del gradiente eléctrico, se recurre a los coeficientes de potencial y se determina la carga total q del haz de conductores, utilizando para ello el radio equivalente [1]. El valor promedio del gradiente eléctrico se obtiene con:

$$E_a = \frac{1}{n_c} \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (5.3)$$

Esto supone que la carga total se encuentra uniformemente distribuida en los n_c subconductores del haz. Sin embargo, el efecto de apantallamiento mutuo de un subconductor sobre el otro conlleva a un valor mayor del gradiente eléctrico hacia afuera del haz ($E_{máx}$) que hacia adentro ($E_{mín}$), los cuales se calculan con:





$$E_{m\acute{a}x} = E_a \left[1 + \frac{(n_c - 1)r}{R} \right] \quad (5.4)$$

$$E_{m\acute{i}n} = E_a \left[1 - \frac{(n_c - 1)r}{R} \right] \quad (5.5)$$

Generalmente se considera que el campo varía alrededor del haz, con lo cual se tiene:

$$E_\theta = E_a \left[1 + \frac{(n_c - 1)r}{R} \cos \theta \right] \quad (5.6)$$

El valor más importante es el de $E_{m\acute{a}x}$, ya que si este sobrepasa el valor del gradiente crítico o de inyección E_c , se empezaran a observar descargas del tipo corona.

5.4 DISEÑO DE CONDUCTORES CON RESPECTO AL ESFUERZO CAUSADO POR LA ALTA TENSIÓN.

Los conductores de una línea de transmisión deben ser capaces de resistir los esfuerzos exigidos debido a la alta tensión hasta un grado razonable. Por esta razón, el diseño de líneas de transmisión considerando estos esfuerzos, tanto a la frecuencia del sistema como ante eventos transitorios, juega un papel muy importante en la selección de los conductores. En las siguientes secciones se describe el diseño de los conductores en base a sus parámetros eléctricos así como cuando se considera el gradiente eléctrico y la presencia de descarga corona en su superficie.

5.4.1 Diseño con Respecto a los Parámetros Eléctricos.

Los parámetros de una línea de transmisión tales como la reactancia inductiva y capacitiva, están fuertemente influenciados por la geometría y datos del conductor como el radio, espaciamiento y número de subconductores y distancias entre conductores y tierra.





Como un ejemplo se tiene una línea de 400 kV la cual se muestra en la Fig. 5.2, en donde se analiza el impacto del uso de 1 conductor por fase, y utilizando haces de 2, 3 y 4 conductores. El espaciamiento entre subconductores del haz utilizado fue de 0.4 m, así que se calculó el radio del haz despejando R de (5.1) y el radio equivalente R_{eq} se obtuvo de (5.2). Los resultados para los diferentes casos se presentan en la Tabla 5.1, en donde se puede observar como las reactancias capacitiva e inductiva así como la impedancia característica decrecen conforme el número de subconductores aumenta. Por otro lado, la potencia característica de la línea (SIL, por sus siglas en inglés) aumenta con el número de subconductores; de hecho, para un haz cuádruple se tiene un SIL de 640 MW. Además la aplicación de un espaciamiento mayor entre subconductores de haz conduce a un aumento en el SIL. Esto se pueden ver en la última fila de la Tabla 5.1, en donde se consideró un espaciamiento de 1.0 m con lo cual se logró incrementar el SIL a 765 MW, es decir, un aumento del 20 % [4].

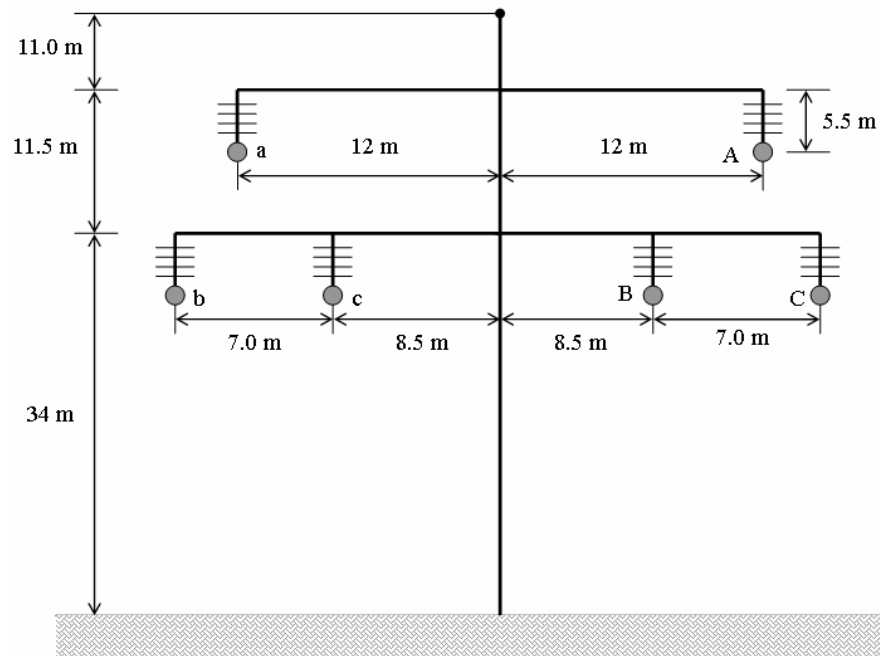


Fig. 5.2. Dimensiones típicas de una torre de suspensión de 400 kV, circuito doble.





Tabla 5.1. Parámetros Eléctricos de una Línea de Transmisión de 400 kV, circuito doble, con diferentes números de subconductores [4].

Número de subconductores	Radio Subconductor (mm)	Radio Equivalente (m)	Reactancia Inductiva (Ω/km)	Resistencia a 50°C (Ω/km)	Capacitancia Secuencia Positiva ($\mu\text{F}/\text{km}$)	Reactancia capacitiva ($\text{M}\Omega*\text{km}$)	Impedancia Característica (Ω)	SIL (MW)
1	29.5	0.030	0.384	0.0193	9.4	0.339	360	445
2	16.5	0.081	0.314	0.0280	11.3	0.282	300	535
3	14.4	0.132	0.280	0.0243	12.6	0.253	260	615
4	11.2	0.178	0.260	0.0300	13.5	0.237	250	640
4 ¹⁾	11.2	0.355	0.217	0.0300	16.2	0.197	210	765

¹⁾ Para este caso se utilizó un espaciamiento entre subconductores de 1.0 m.

5.4.2 Diseño con Respecto al Gradiente en la Superficie de los Conductores y Efecto Corona.

La configuración y dimensiones de los conductores están relacionadas con el gradiente que se presenta en la superficie de los conductores, y por lo tanto de la generación de corona. Debido a las consecuencias que trae consigo el efecto corona, el valor máximo del gradiente en la superficie de los conductores debe mantenerse por debajo de ciertos límites. En la práctica, se recomienda que el gradiente superficial en los conductores de una línea aérea se limite a 17 kV_{rms}/cm [4]. Por consiguiente, los conductores deben ser seleccionados de tal forma que se cumpla con los requerimientos sobre las emisiones de radiointerferencia y ruido audible. En la siguiente sección se analiza más en detalle el uso de conductores en haz para el control del gradiente eléctrico.



5.5 DISTRIBUCIÓN DEL CAMPO ELÉCTRICO EN LA SUPERFICIE DE LOS CONDUCTORES.

Con el fin de visualizar la distribución del campo eléctrico en el área circundante a un conductor energizado con alta tensión, se realizaron algunas simulaciones con diferentes arreglos de conductores en haz utilizando una herramienta de modelado de fenómenos físicos mediante la aplicación de elemento finito (COMSOL Multiphysics®) [45], [46].

Se simularon casos para 1, 2 y 4 conductores por haz, obteniendo la distribución del campo eléctrico y las líneas equipotenciales en la vecindad de los conductores. Primeramente, se analiza un conductor energizado con 400 kV. Partiendo del centro del conductor, se trazó una línea imaginaria (línea de evaluación) terminada 1m a la izquierda y 1m a la derecha sobre la cual se calculó la intensidad de campo eléctrico. Las características del conductor y las líneas equipotenciales en el área circundante se muestran en la Fig. 5.3 y en la Fig. 5.4 se presenta la curva obtenida, observando que la mayor intensidad de campo eléctrico se encuentra en la superficie del conductor, con un valor cercano a 14 kV/cm. En la Fig. 5.5 se muestra que, como era de esperarse, en toda la superficie del conductor se presenta la mayor intensidad de campo eléctrico la cual va disminuyendo conforme la distancia al conductor sea mayor.

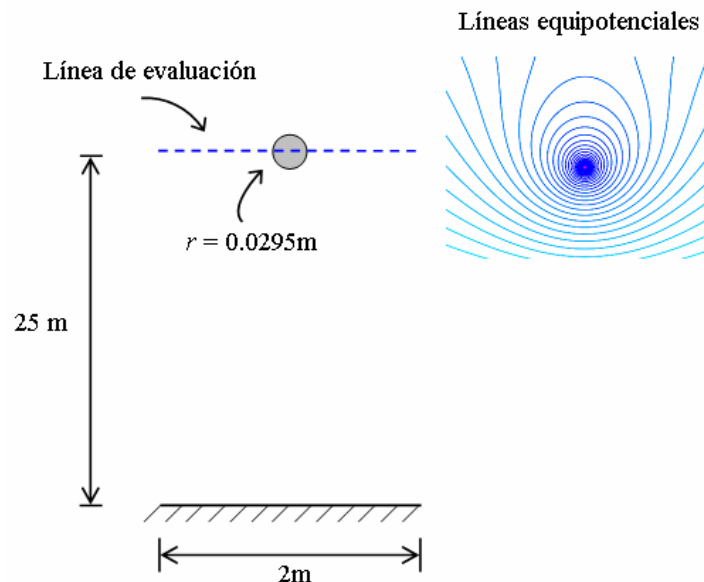


Fig. 5.3. Líneas equipotenciales alrededor de un conductor energizado con 400 kV.

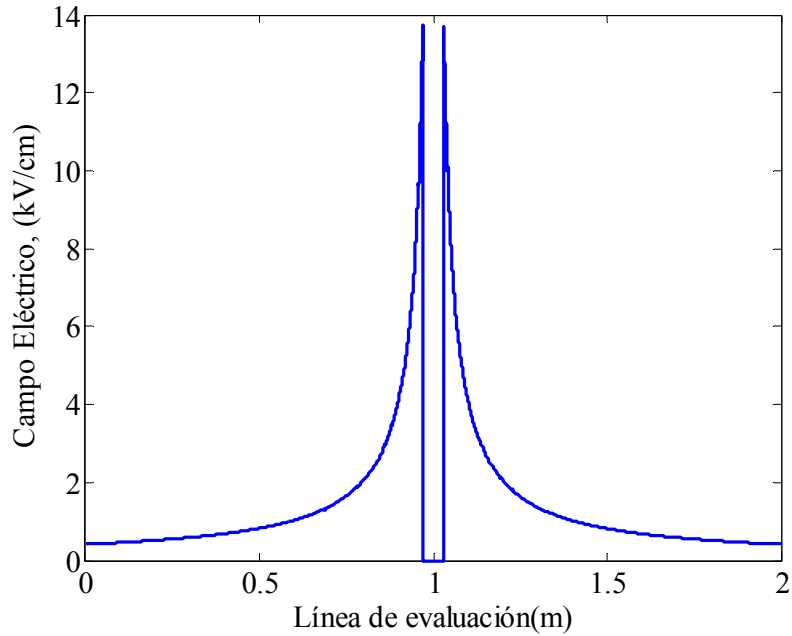


Fig. 5.4. Intensidad de campo eléctrico en un conductor.

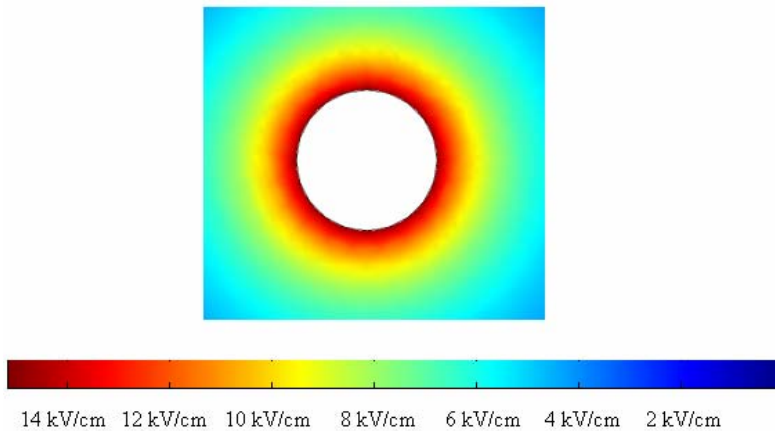


Fig. 5.5. Distribución del campo eléctrico alrededor de un conductor.

También se realizaron simulaciones para un haz de 2 y otro de 4 conductores mediante el mismo análisis que en el caso anterior. Las características de las configuraciones y la distribución de las líneas equipotenciales se muestran en las Figuras 5.6 y 5.9. De igual forma al caso anterior, se trazó una línea de evaluación que pasa por el centro de los conductores, sobre la cual se calculó la intensidad del campo eléctrico. En la Fig. 5.7 se presenta la curva obtenida para un haz de 2 conductores, observando que la mayor intensidad de campo eléctrico se encuentra en la superficie externa del haz de conductores,

con un valor de alrededor de 15 kV/cm aun cuando el radio de los subconductores es considerablemente menor que en el caso anterior de un conductor único. En la Fig. 5.10 se observa la curva obtenida para un haz de 4 conductores; en este caso la intensidad de campo eléctrico máxima en la superficie externa del haz de conductores es de alrededor de 12 kV/cm, aunque se utilizaron conductores de menor radio que en el haz de 2 conductores.

Finalmente, en las Figuras 5.8 y 5.11 se presentan las distribuciones del campo eléctrico para un haz de 2 y un haz de 4 conductores respectivamente, notándose que las mayores intensidades se encuentran en la superficie externa de los conductores.

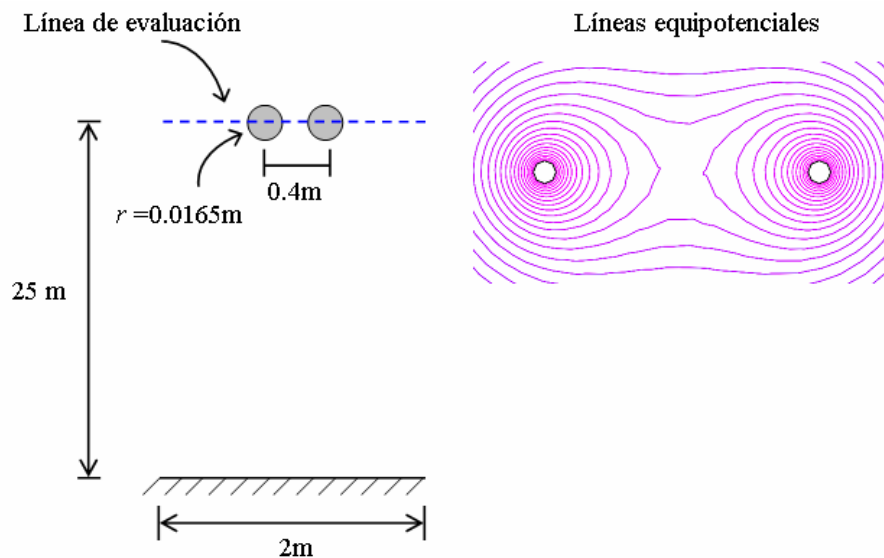


Fig. 5.6. Líneas equipotenciales alrededor de un haz de 2 conductores energizados con 400 kV.

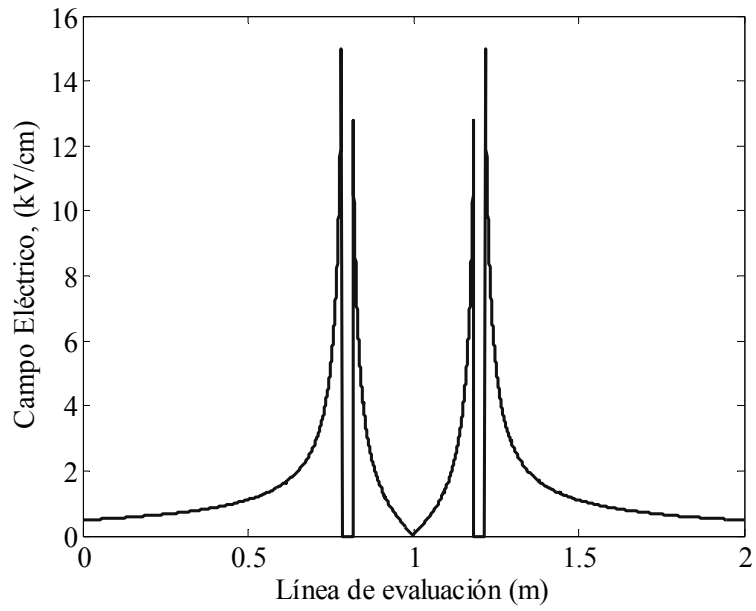


Fig. 5.7. Intensidad de campo eléctrico en un haz de 2 conductores.

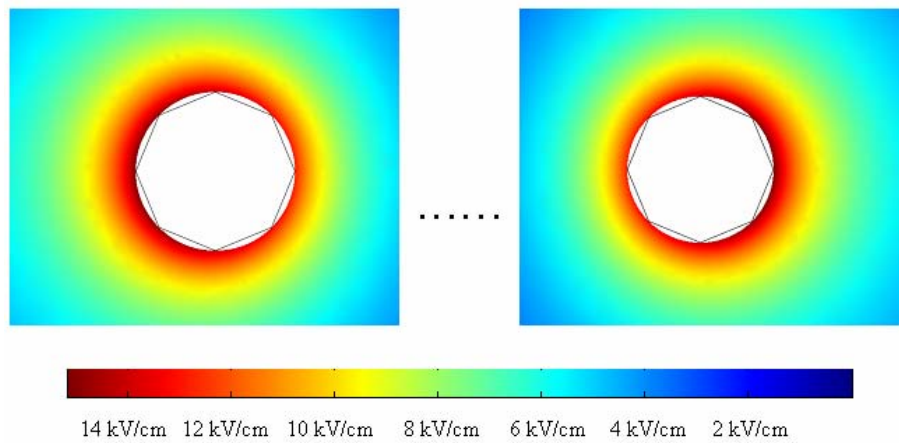


Fig. 5.8. Distribución del campo eléctrico alrededor de un haz de 2 conductores.

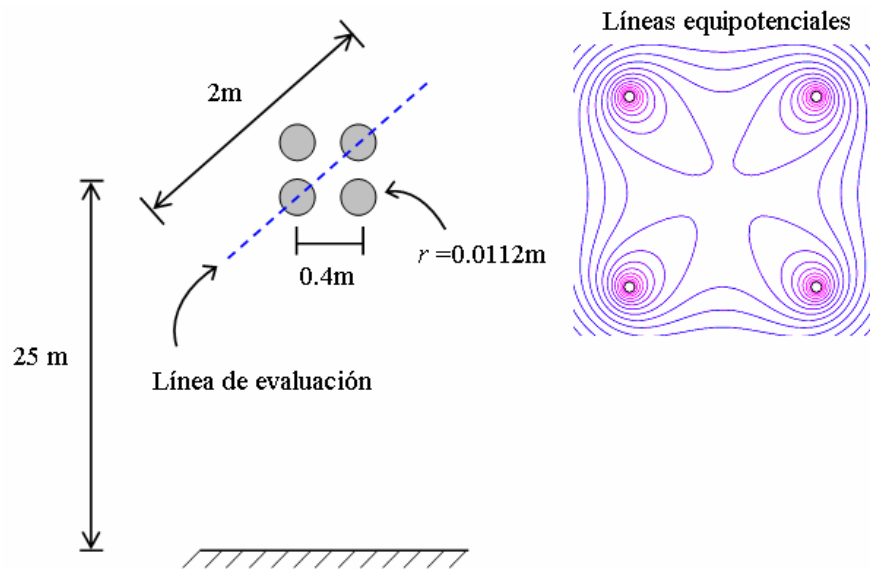


Fig. 5.9. Líneas equipotenciales alrededor de un haz de 4 conductores energizados con 400 kV.

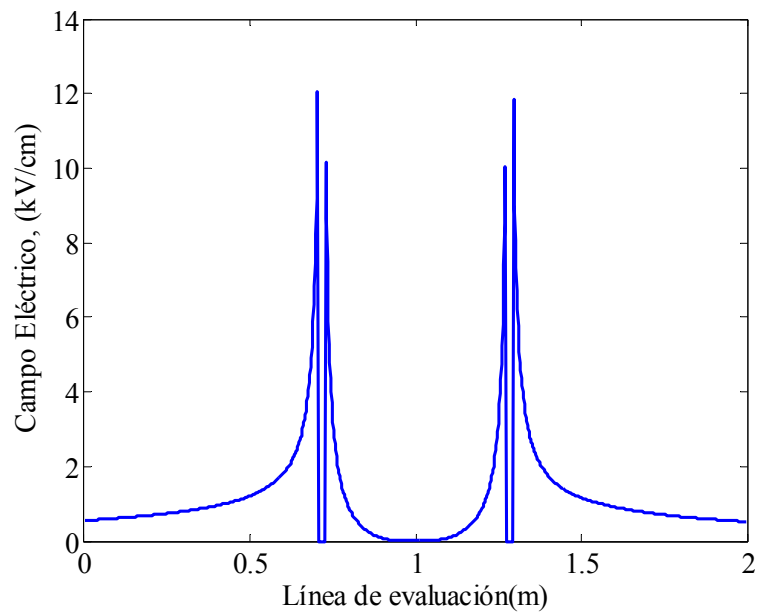


Fig. 5.10. Intensidad de campo eléctrico en un haz de 4 conductores.

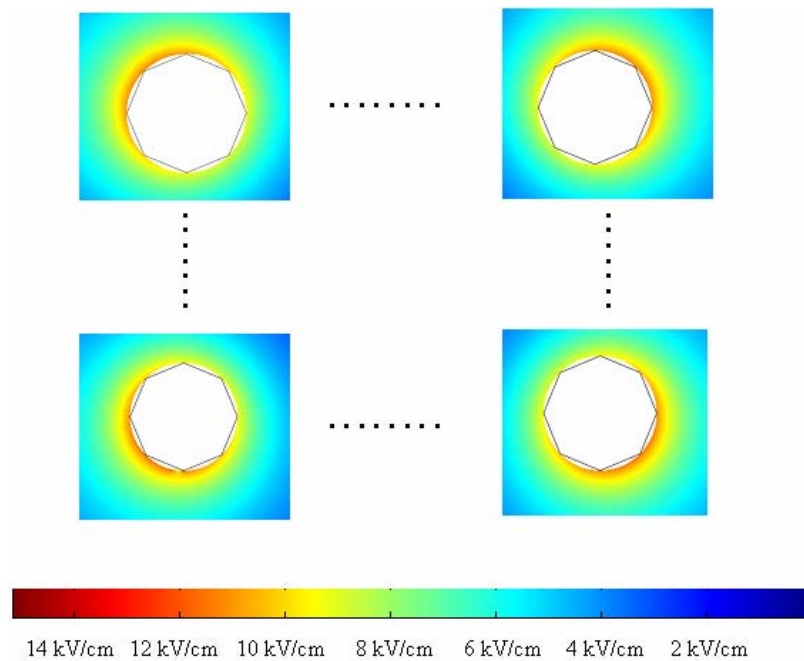


Fig. 5.11. Distribución del campo eléctrico alrededor de un haz de 4 conductores.

5.6 APLICACIÓN DE CRITERIOS PARA LA ATENUACIÓN DE NIVELES DE RI.

Como se ha mencionado anteriormente, a fin de reducir el campo eléctrico superficial en los conductores, generalmente lo que se hace es aumentar el radio de los mismos. Analizando la Tabla 5.1 se observa que el radio equivalente de un haz de conductores aumenta conforme el espaciamiento entre subconductores sea mayor, y también conforme el número de subconductores por fase aumente.

A continuación se presentan los resultados obtenidos al considerar la variación en el espaciamiento entre subconductores lo cual a su vez modifica el radio del haz, y también al utilizar mayor cantidad de subconductores por haz, con el fin de atenuar los perfiles de radiointerferencia generados por la línea de transmisión.



5.6.1 Variación en el espaciamiento entre subconductores.

Para este caso se considera una línea de 400 kV, cuyos datos y configuración geométrica se presentaron en la sección 4.3.1, Ejemplo 2. Aplicando el método descrito en el Capítulo IV para la predicción de niveles de RI, se realizaron simulaciones para el cálculo de perfiles de RI utilizando diferentes espaciamientos en un rango de 0.1 m a 1 m.

En la Fig. 5.12 se presentan los diferentes perfiles obtenidos para 6 valores de espaciamiento entre subconductores. Se puede observar que los menores perfiles de RI se obtienen con espaciamientos entre 0.2 y 0.4 m, pero si se sigue aumentando el radio de haz, los perfiles también lo hacen.

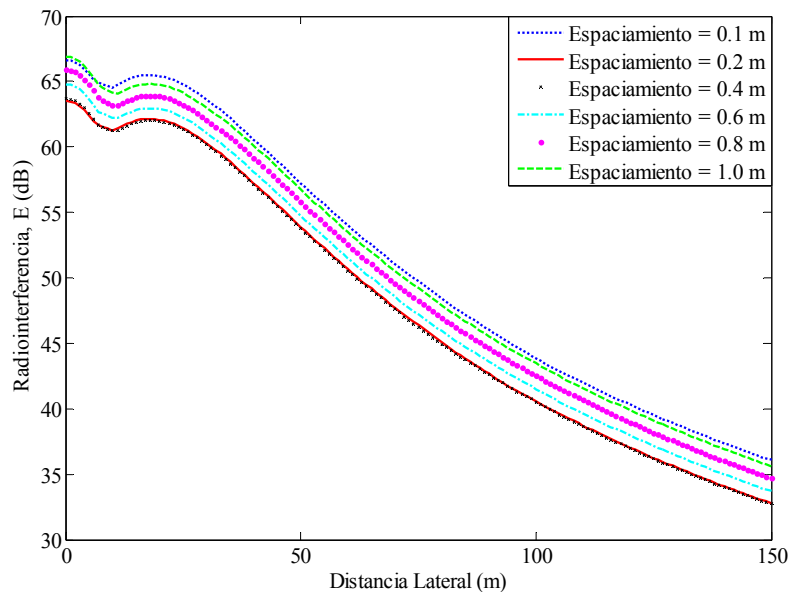


Fig. 5.12. Perfil de RI de una línea de 400 kV para diferentes espaciamientos entre subconductores.

Se realizó el mismo análisis para un total de 5 líneas diferentes, las cuales se estuvieron empleando en los ejemplos de aplicación de la sección 4.3. Los datos y características geométricas también se pueden observar en la misma sección. En este caso, se realizaron





simulaciones para el cálculo de niveles de RI a una distancia de 50 m desde la fase central de las líneas utilizando diferentes espaciamientos entre subconductores.

En la Tabla 5.2 y Fig. 5.13 se presentan los resultados obtenidos. Se observa que existe un cierto rango de valores de espaciamiento en los cuales se presentan los menores niveles de RI, en general entre 0.2 y 0.3 m; no obstante, a partir de cierto punto, al ir aumentando la distancia de espaciamiento entre subconductores, también aumentan los perfiles de RI. Lo anterior muestra que un aumento excesivo en el espaciamiento entre subconductores puede ser contraproducente desde el punto de vista de radiointerferencia, por lo cual se tiene que seleccionar la distancia óptima entre los mismos. Este fenómeno se vuelve más evidente a medida que la tensión incrementa como se puede apreciar en la Fig. 5.13.

Tabla 5.2. Comparaciones de Niveles de RI variando el espaciamiento entre subconductores para diferentes líneas a una distancia de 50 m.

Espaciamiento entre subconductores (m)	Línea de 345 kV RI (dB)	Línea de 380 kV RI (dB)	Línea de 400 kV RI (dB)	Línea de 500 kV RI (dB)	Línea de 750 kV RI (dB)
0.1	58.92	56.61	56.72	65.42	70.80
0.2	56.49	53.30	53.22	59.34	65.02
0.3	56.61	53.35	52.79	58.31	64.31
0.4	57.20	53.83	53.02	58.51	64.75
0.5	57.90	54.41	53.49	59.12	65.57
0.6	58.59	55.00	54.00	59.88	66.61
0.7	59.26	55.57	54.52	60.69	67.48
0.8	59.90	56.11	55.02	61.50	68.44
0.9	60.50	56.62	55.50	62.31	69.39
1.0	61.06	57.10	55.97	63.09	70.30



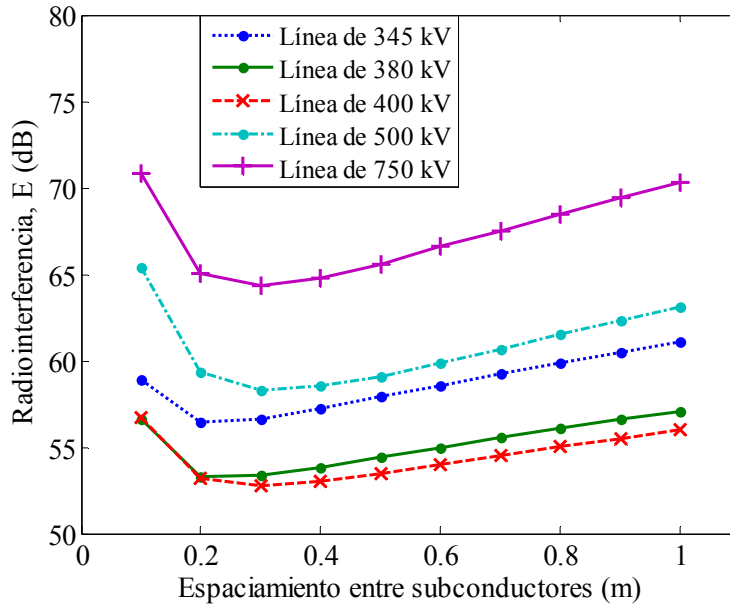


Fig. 5.13. Niveles de RI en función del espaciamiento entre subconductores de haz.

5.6.2 Variación en el número de subconductores.

Otra de las maneras de aumentar el radio equivalente de un haz de conductores con el fin de disminuir los niveles de radiointerferencia generados por una línea de transmisión, es mediante el aumento de subconductores por fase. Nuevamente se emplea una línea de 400 kV para analizar el comportamiento de los perfiles de radiointerferencia con respecto al número de subconductores por haz. Los datos y configuración geométrica de la línea en cuestión se presentaron en la sección 4.3.1, Ejemplo 2.

En este caso, se obtuvieron los perfiles de RI variando el número de subconductores por fase desde 1 hasta 4. Generalmente, conforme el número de subconductores aumente, se tienden a utilizar radios menores, pero aún así el radio equivalente del haz irá aumentando. En la Tabla 5.3 se muestran los datos utilizados en cada una de las simulaciones, así como los resultados obtenidos como lo son los gradientes eléctricos para cada una de las fases, así como los niveles de radiointerferencia generados a una distancia de 50 m a partir de la fase central de la línea. En la Fig. 5.14 se observan los diferentes perfiles de RI para diferentes tipos de haz. Como se puede observar, conforme el número de subconductores aumente, los niveles de RI disminuirán. El cambio más notorio se observó en los perfiles para 2 y 3





subconductores por haz, ya que utilizando 3 subconductores se tiene un perfil de 8 decibeles menos que utilizando 2 subconductores.

Tabla 5.3. Niveles de RI de una Línea de Transmisión de 400 kV a 50 m de la fase central, con diferentes números de subconductores.

Número de subconductores	Radio Subconductor (m)	Espaciamiento entre subconductores (m)	Radio Equivalente (m)	Gradiente eléctrico kV/cm			RI (dB)
				Fase A	Fase B	Fase C	
1	0.0295	-	0.0295	12.5608	13.3757	12.5608	54.77
2	0.0165	0.4	0.081	14.5274	15.6909	14.5274	53.02
3	0.0144	0.4	0.132	12.7238	13.8685	12.7238	44.69
4	0.0112	0.4	0.178	13.0422	14.3109	13.0422	42.08

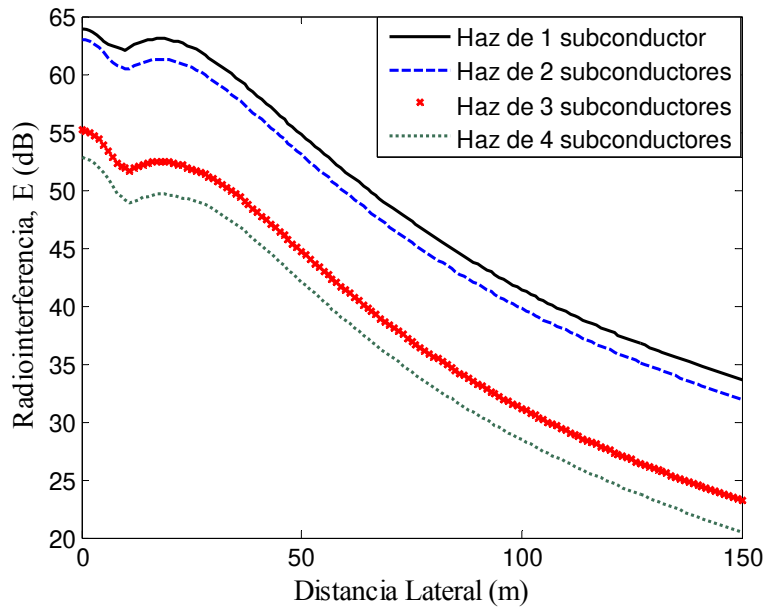


Fig. 5.14. Perfil de RI de una línea de 400 kV en función del número de subconductores por haz.

En las Figuras 5.15 y 5.16 se muestran los resultados obtenidos para dos líneas más, una de 345 kV y otra de 500 kV. Los datos de los conductores y resultados de los perfiles de RI se aprecian en la Tabla 5.4. Los datos acerca de las configuraciones geométricas para ambas líneas se presentaron en la sección 4.3.





Tabla 5.4. Datos y Niveles de RI a 50 m de la fase central, con diferente número de subconductores.

Tensión kV	Número de conductores por haz	Radio Subconductor (m)	Espaciamiento entre subconductores (m)	Radio Equivalente (m)	Gradiente eléctrico kV/cm			RI (dB)
					Fase A	Fase B	Fase C	
345	1	0.0223	-	0.0223	15.4782	15.7993	15.8748	60.94
345	2	0.0138	0.45	0.0788	17.0192	17.4513	17.5157	59.15
345	3	0.0112	0.45	0.1314	16.1567	16.6091	16.6563	53.79
500	2	0.0223	0.45	0.1002	15.8279	14.9588	16.1363	65.73
500	3	0.0147	0.45	0.1439	17.6529	16.5754	18.0076	64.53
500	4	0.0112	0.45	0.1949	18.6523	17.4002	19.0371	63.05

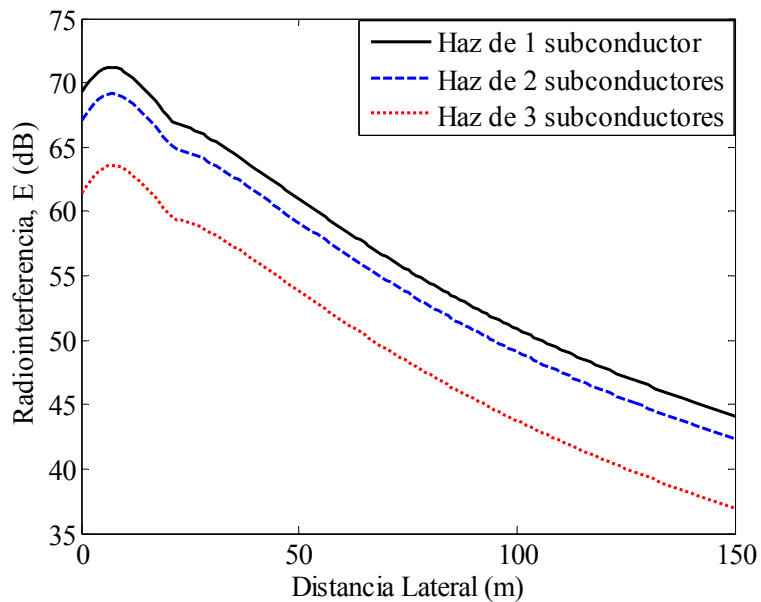


Fig. 5.15. Perfil de RI de una línea de 345 kV en función del número de subconductores por haz.



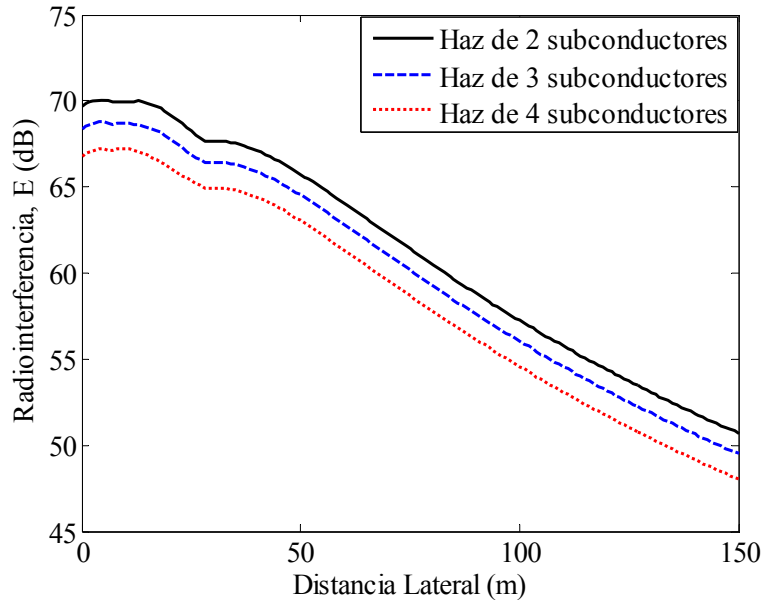


Fig. 5.16. Perfil de RI de una línea de 500 kV en función del número de subconductores por haz.

5.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el fin de visualizar la distribución del campo eléctrico en la vecindad de diferentes arreglos de conductores en haz, se utilizó el programa COMSOL Multiphysics® mediante el cual se realizaron simulaciones para obtener las intensidades de campo eléctrico en la superficie de los conductores y el comportamiento de las líneas equipotenciales.

Para los arreglos de 1 y 2 conductores en haz, se obtuvieron intensidades de campo eléctrico de 14 y 15 kV/cm respectivamente; sin embargo, debe tomarse en cuenta que el radio utilizado en el haz de 2 conductores es mucho menor que el utilizado en la simulación de un solo conductor, ya que en la práctica mientras el número de conductores por fase de una línea de transmisión aumenta, los radios de los mismos suelen disminuirse. La ventaja de utilizar el haz de 2 conductores radica principalmente en el incremento del SIL, manteniendo la intensidad de campo eléctrico por abajo del valor máximo recomendado. La reducción de la intensidad del campo eléctrico en la superficie de los conductores se hizo más evidente en el arreglo de 4 conductores por haz; descendió a 12 kV/cm.



Se aplicaron dos técnicas para la reducción de la intensidad del campo eléctrico en la superficie de los conductores de una línea de transmisión, y en consecuencia los perfiles de radiointerferencia debidos al efecto corona. Una de esas técnicas fue la variación del espaciamiento entre subconductores, en donde se mostró que el espaciamiento óptimo para las 5 líneas estudiadas se encuentra en 0.2 y 0.3 m. No obstante, si el espaciamiento aumenta, los niveles de radiointerferencia también lo hacen, por lo cual es necesario seleccionar adecuadamente el valor del espaciamiento para cada caso en particular. A medida que la tensión de la línea aumenta, el efecto del espaciamiento entre subconductores se vuelve más crítico.

Por otro lado, al aumentar el número de conductores por fase se logra obtener atenuaciones de radiointerferencia más significativas. Para el caso de la línea de 400 kV, el cambio más notorio se observó en los perfiles de 2 a 3 subconductores por haz, ya que utilizando 3 subconductores se logró minimizar 8 decibeles con respecto al perfil obtenido con 2 subconductores. En el caso de la línea de 345 kV, la atenuación más significativa también se observó en los perfiles de 2 a 3 subconductores por haz, con una reducción de alrededor de 6 dB. Finalmente, para la línea de 500 kV, la atenuación de los perfiles de radiointerferencia de 2 a 3 y de 3 a 4 subconductores fue de solamente 2 dB. Esto puede deberse al tipo de configuración de conductores (vertical) en este caso.





CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

6.1 CONCLUSIONES GENERALES.

Debido a que en la actualidad la tecnología en las comunicaciones a altas frecuencias ha venido desarrollándose considerablemente, se ha visto la necesidad de contar con herramientas para la determinación de los niveles de radiointerferencia que genera una línea de transmisión, con el fin de seleccionar distancias seguras de instalación de líneas de comunicación y dispositivos electromagnéticos que pueden ser afectados debido a la interferencia electromagnética generada por corona en líneas de alta tensión.

En este trabajo se presentó un método basado en el de Gary (llamado en este trabajo Método 1), para la estimación de los niveles de Radiointerferencia (RI) generada por líneas de transmisión de alta tensión con efecto corona. En el método de Gary se utilizan constantes de atenuación promedio únicamente para configuraciones de línea horizontal y triangular, además para desacoplar el sistema trifásico se emplean modos de Clarke. Por otro lado, en el método propuesto en este trabajo (Método 2), las constantes de atenuación se obtienen a partir de los parámetros de la línea, además para desacoplar el sistema se utilizó descomposición modal.

Los ejemplos de aplicación muestran que en ciertos casos los resultados de ambos métodos pueden tener diferencias muy significativas, las cuales van acrecentándose conforme aumenta la distancia lateral de la línea. Lo anterior señala que las suposiciones realizadas en el método de Gary (método 1), pueden provocar resultados erróneos. Las comparaciones realizadas con 5 mediciones efectuadas a diferentes líneas de transmisión, muestran que las





modificaciones hechas al método de Gary en el cálculo de las constantes de atenuación y descomposición modal, arrojan mejores resultados.

Debido a que el campo eléctrico en la superficie de los conductores es el factor determinante en la aparición del efecto corona, se buscó aumentar el radio equivalente de los conductores en haz para que consecuentemente se atenuaran los perfiles de RI. Se aplicaron dos técnicas para conseguir lo anterior; una de ellas fue variar el espaciamiento entre subconductores de haz, en donde se observó que se tiene que seleccionar cuidadosamente la distancia óptima ya que con espaciamientos muy cortos o muy largos, se tienen incrementos en los perfiles de radiointerferencia. Por otro lado, con el aumento de conductores por fase, se logra disminuir considerablemente los perfiles de RI de una línea de transmisión.

Aunque existen instrumentos de medición para medir los niveles de RI, el uso de herramientas computacionales nos permite predecir la radiointerferencia que generará una línea que aún no se ha instalado, esto con el fin de tomar en consideración estas radiaciones en el diseño de líneas de transmisión. Además, si fuese necesario colocar líneas de comunicación cercanas a la línea de potencia, se pueden determinar distancias seguras de instalación para evitar perturbaciones en las señales de comunicación.

6.2 APORTACIONES DE LA TESIS.

Como aportaciones sobresalientes del presente trabajo se pueden citar las siguientes:

- Se propone un método para la predicción de niveles de radiointerferencia que puede generar una línea de transmisión monofásica o multiconductora de alta tensión con corona, bajo condiciones de lluvia densa. Dicho método toma en consideración las características geométricas de la línea en particular, mediante el cálculo de constantes de atenuación a partir de los parámetros de la línea. En particular, para el cálculo de la impedancia serie de la línea se considera el efecto skin por medio del





concepto de profundidad de penetración compleja tanto en el conductor como en el retorno por tierra. Por otro lado, para desacoplar el sistema, se aplica descomposición modal. Con las consideraciones anteriores, es posible aplicar el método de cálculo de niveles de radiointerferencia para cualquier configuración de línea, logrando obtener resultados más precisos.

- También, se analizó la influencia de la variación del número de conductores por haz y espaciamiento entre subconductores, en los perfiles de radiointerferencia de la línea. Con lo anterior fue posible cuantificar los niveles de radiointerferencia que pueden ser atenuados aplicando estas técnicas. Se muestra la existencia de una distancia óptima para la separación entre subconductores.

6.3 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.

Algunos de los trabajos recomendados como continuación de esta tesis son los siguientes:

- Realizar las adecuaciones necesarias al método presentado en este trabajo, a fin de aplicarlo para el cálculo de perfiles de radiointerferencia de líneas de transmisión de alta tensión en configuraciones de circuito doble y en sistemas HVDC. Comparar los resultados obtenidos con mediciones experimentales para este tipo de líneas.
- Proponer distintas técnicas para la atenuación de radiointerferencia generada por líneas de alta tensión de CA y CD, mediante el análisis de la influencia del número de conductores por fase, distancia entre fases y altura sobre el nivel de suelo, tipos de conductores, e inclusive examinar algún posible tipo de blindaje. Analizar las normas que regulan las emisiones de radiointerferencia.





- Analizar los efectos de campos electromagnéticos de baja frecuencia generados por líneas de transmisión. Adicionalmente, investigar las normas que regulan este tipo de emisiones y proponer blindajes con los materiales adecuados para la atenuación de dichos campos, hasta los niveles permitidos por las normas.
- Realizar trabajo experimental para verificar el efecto en la radiointerferencia de parámetros tales como la altitud y la contaminación, tanto en conductores como en aisladores.





REFERENCIAS

- [1] L. A. Siegert, *Alta Tensión y Sistemas de Transmisión*. Editorial Limusa, 1988.
- [2] Project UHV, *Transmission Line Reference Book 345 kV and Above*, Second Edition, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1982.
- [3] P. Sarma Maruvada, *Corona Performance of High-Voltage Transmission Lines*, Research Studies Press Ltd., England 2000.
- [4] F. Kiessling, P. Nefzger, J. F. Nolasco, U. Kaintzyk, *Overhead Power Lines*, Springer-Verlag, Germany 2003.
- [5] L. B. Loeb, *Electrical Coronas, Their Basic Physical Mechanisms*, California Press, Berkeley, 1965.
- [6] C. H. Gary "The Theory of the Excitation Function: A Demonstration of its Physical Meaning", *IEEE Winter Power Meeting*, New York, N.Y., January 31 –February 5, 1971.
- [7] M. R. Moreau, C. H. Gary, "Predetermination of the Radio-Interference Level of High Voltage Transmission Lines. I – Predetermination of the Excitation Function", *IEEE Summer Meeting and International Symposium on High Power Testing*, Portland, Ore., July 18 -23, 1971.
- [8] M. R. Moreau, C. H. Gary, "Predetermination of the Radio-Interference Level of High Voltage Transmission Lines. II – Field Calculating Method", *IEEE Summer Meeting and International Symposium on High Power Testing*, Portland, Ore., July 18 -23, 1971.
- [9] L. V. Timashova, "Statistical Investigations of Radio Interference on 750 kV Transmission Lines", *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Symposium Record. Volume, Issue: 2 – 4, Pages: 424 - 429. Aug. 1988.
- [10] Y. Nakano, Y. Sunaga, "Availability of Corona Cage for Predicting Radio Interference Generated from HVDC Transmission Line", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5, No. 3, pp. 1436 – 1442. July 1990.





- [11] R. G. Olsen, S. D. Scheum, Vernon, "Comparison of Several Methods for Calculating Power Line Electromagnetic Interference Levels and Calibration with Long Term Data", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, No. 2, pp. 903 – 913. April 1992.
- [12] D. G. Fern, Steven C. Tietsworth, "Detection of Electrical Corona on Low Frequency Radio Transmit Antenna Systems", *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1992. IMTC apos; 92., 9th IEEE*, Volume , Issue , 12-14 Pages: 470 – 473, May 1992.
- [13] V. L. Chartier, D. E. Blair, M. D. Easley, "Corona Performance of a Compact 230-kV Line", *Transmission and Distribution Conference, 1994.*, Proceedings of the 1994 IEEE Power Engineering Society, Volume , Issue , 10-15 Apr 1994 Pages:512-520.
- [14] M. Lauersdorf, K. Feser, "Detection and Suppression of Corona Discharges During PD-Measurement by Means of RI-Reception", *Conference Record of the 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Pittsburg, PA USA, June 5 – 8, Pages: 310 – 313, 1994..
- [15] N. Giao Trinh, "Partial Discharge XX: Partial Discharges in Air Part II: Selection of Line Conductors", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, No. 2, pp. 903 – 913. April 1995.
- [16] R. G. Olsen, Steven D. Schennum, "A Method for Calculating Wide Band Electromagnetic Interference from Power Line Corona", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 10, No. 3, pp. 1535 – 1540. July 1995.
- [17] J. Boo Kim, K. Ho Yang, J. Yoon Koo, "KEPCO 765 kV Transmission System Development: Corona and Electric Field Effects Studies", *International Conference on Energy Management and Power Delivery*. Proceedings of EMPD '95., Volume: 1, pages: 288-291, 1995.
- [18] P. Kumar, R. Garg, M. S. Thomas, "Some Studies of Corona Noise Interference due to EHV Lines", *International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility*, Volume , Issue , 6-8 Pages:82 – 90, Dec., 1995.
- [19] J. N. Sinha, Baharudin Jili, "Studies on Corona Power Loss and Radio Interference Under Different Electrode Configurations", *Electrical Insulation and Dielectric*





- Phenomena*. IEEE 1997 Annual Report, Volume 2, Issue , 19-22, Page: 603, Oct 1997.
- [20] M. Kanya Kumari, O. Rajesh Kumar, P. V. V. Nambudiri, K. N. Srinivasan. “Computation of Electrical Environmental Effects of Transmission Lines”. *High Voltage Engineering Symposium*, 22 – 27 August 1999, Conference Publication No. 467, IEE, 1999.
- [21] S. Phaiboon, V. Vivek, S. Somkuarnpanit, “Analysis and Measurement of Radio-Frequency Interference due to The Corona from 500 kV Transmission Lines”, *TENCON 2000. Proceedings*, Volume: 1, pages: 88-91, Meeting Date: 24 – 27 September 2000.
- [22] M. A. Abd-Allah, A. S. Alghamdi, “Ion Trajectories and Corona Effects at Converting one Circuit of a Double Circuit AC line to DC”, *Power Engineering Society Summer Meeting, 2001. IEEE*, Vol. 3, Pages:1749-1753, 2001.
- [23] Q. Zhou, C. Sun, L. Liu, W. Sima, W. An, “Electromagnetic Environment of the EHV Transmission Line and its Effect”, *International Symposium Electrical Insulating Materials, 2001*. pages: 229-232, Meeting Date: 19-22 November 2001.
- [24] S. K. Nayak, M. Joy Thomas. “Computation of EMI Fields Generated Due to Corona on High Voltage Over Head Power Transmission Lines”, *In Proceedings International Conference on Electromagnetic Interference and Compatibility*, 2001/02, pages: 15-19, Bangalore, India, 2001.
- [25] S. K. Nayak, M. Joy Thomas, “A Novel Technique for the Computation of Radiated EMI due to Corona on HV Transmission Lines”, *Electromagnetic Compatibility, IEEE International Symposium on*. Volume 2, Issue, 18-22 Pages:738-742, Aug. 2003.
- [26] A. Mujcic, N. Suljanovic, M. Zajc, J. F. Tasic, “Corona Noise on a 400 kV Overhead Power Line: Measurements and Computer Modelling”, *Electrical Engineering*, Springer Berlin / Heidelberg, Volume 86, Number 2, , pages: 61-67, January 2004.
- [27] N. Suljanovic, A. Mujcic, M Zajc, J. F. Tasic, “Computation of High-Frequency and Time Characteristics of Corona Noise on HV Power Line”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, No. 1, pp. 71 – 79. January 2005.





- [28] M. Zajc, N. Suljanovic, A. Mujcic, J. F. Tasic, “Frequency Characteristics Measurement of Overhead High-Voltage Power-Line in Low Radio-Frequency Range”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 22, No. 4, pp. 2142 – 2149. October 2007.
- [29] L. M. Checa, *Líneas de Transporte de Energía*, 3ra edición, Editorial Marcombo, Barcelona España, 1988.
- [30] E. Nasser, *Fundamentals of Gaseous Ionization and Plasma Electronics*, Wiley - Interscience, USA 1971.
- [31] V. L. Chartier, R. D. Stearns, “Formulas for Predicting Audible Noise from Overhead High-Voltage AC and DC Lines”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 100 p.p. 121 – 130, 1981.
- [32] T. J. Gallagher and I. M. Dudurych, “Model of Corona for an EMTP study of surge propagation along HV transmission lines”, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 151, No. 1, January 2004.
- [33] A. I. Ramírez Vázquez, *Transitorios Electromagnéticos en Líneas de Transmisión considerando Parámetros dependientes de la Frecuencia y Efecto Corona*, Tesis de Maestría, Universidad de Guadalajara, Agosto 1998.
- [34] S. K. Nayak, M. Joy Thomas, “Computation of EMI Fields Generated Due to Corona on High Voltage Over Head Power Transmission Lines”, *Proceedings of INCEMIC*, 2001 – 2202.
- [35] C. Gary, D. Cristescu, O. Dragan, “Distorsion and Attenuation of Travelling Waves Caused by Transient Corona”, *CIGRE Report, Study Committee 33: Overvoltages and Insulation Coordination*, 1989.
- [36] CISPR Publication No. 1, *Specifications for CISPR Radio Interference Measuring Apparatus for the Frequency Range 0.15 to 30 MHz*, 1972.
- [37] *IEEE Standard Procedures for the Measurement of Radio Noise from Overhead Power Lines and Substations*, ANSI/IEEE Std 430-1986.
- [38] C. Gary, “Approche complète de la propagation multifilaire en haute fréquence par utilisation des matrices complexes,” *EDF Bull. Direction des Études et Rech.*, no. 3/4, pp. 5–20, 1976.





- [39] J. J. Grainger, W. D. Stevenson, Jr. *Análisis de Sistemas de Potencia*. Editorial McGRAW – HILL, 1996.
- [40] J. D. Glover, M. S. Sarma. *Análisis y Diseño de Sistemas de Potencia*, Tercera edición, Editorial Thomson Learning. México 2004.
- [41] <http://www.cfe.gob.mx/es/LaEmpresa/transmisionydistribucion>.
- [42] P. Clayton R., *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, Wiley – Interscience Publication, United States 1992.
- [43] J. Vernieri, P. Arnera, C. Massei, “Exposición a Campos Eléctricos y Magnéticos de Frecuencia Industrial y sus Posibles Efectos en la Salud Humana, Reglamentaciones de Valores Límites de Exposición: Seguimiento y Actualización”, IX Encuentro Regional Latino – Americano del Cigré, 27 al 31 de Mayo, Brasil 2001.
- [44] <http://www.who.int/peh-emf/project/es/>.
- [45] COMSOL User’s Guide and Introduction. COMSOL AB, 2005.
- [46] COMSOL Reference Manual. COMSOL AB, 2005.
- [47] *NEMA Standard Methods of Measurement of Radio Influence Voltage (RIV) of High Voltage Apparatus*, 107-1987 (R1993).
- [48] F. P. Espino Cortés, “*Caracterización de Descargas Corona en Corriente Directa*”, Tesis de Maestría, SEPI-ESIME, IPN, Unidad Zacatenco, 2002.
- [49] M. Dávila, “*Análisis de Transitorios Electromagnéticos en Líneas de Transmisión Multiconductoras con Efecto Corona y Dependencia Frecuencial*”, Tesis de Maestría, CINVESTAV-IPN, Unidad Guadalajara, Junio 2002.
- [50] A. Rangel Merino, R. Linares y Miranda, J. L. López Bonilla, “Estimación de emisiones electromagnéticas de campo lejano a partir de mediciones de campo cercano (Un enfoque a las líneas de energía eléctrica)”, *Revista Científica, ESIME, IPN*, Vol. 11, Núm. 2, Abril – Junio 2007.
- [51] M. Ramírez L., F. Figueroa G., J. Ledesma Z., “Medición de tensión inducida y campo eléctrico en sondas capacitivas bajo líneas de transmisión y su simulación digital bidimensional”, *Vigésima Reunión de Verano de Potencia y Aplicaciones Industriales RVP-AI/2007*, Acapulco, Gro., México, 8 al 14 de Julio del 2007.





- [52] H. Pérez, M. Zavala, A. Galván, “Campos electromagnéticos producidos por líneas de transmisión y la compatibilidad electromagnética en derechos de vía compartidos”, Boletín Instituto de Investigaciones Eléctricas, Julio – Agosto 1998.
- [53] M. Dávila, J. L. Naredo, P. Moreno, “A Characteristics Model for Electromagnetic Transient Analysis of Multiconductor Lines with Corona and Skin Effects”, *International Conference of Power Systems Transients (IPST’05)*, Montreal, Canada, June 2005.
- [54] J. L. Naredo, A. C. Soudack, J. R. Martí. "Simulation of transients on transmission lines with corona via the method of characteristics", *IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 142, No. 1, January 1995, Pages:81 – 87.





APÉNDICE A

DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS POR UNIDAD DE LONGITUD DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN.

A.1 INTRODUCCIÓN

Una línea de transmisión tiene cuatro parámetros que definen completamente su comportamiento como parte del sistema de potencia: Resistencia (R), Inductancia (L), Capacitancia (C) y Conductancia (G). Generalmente, la conductancia en una línea aérea es despreciable.

A.2 LÍNEA MONOFÁSICA

A.2.1 Inductancia Geométrica.

Se aplica el método de las imágenes e inicialmente se asume que el retorno por tierra es un conductor perfecto ($P_e=0$).

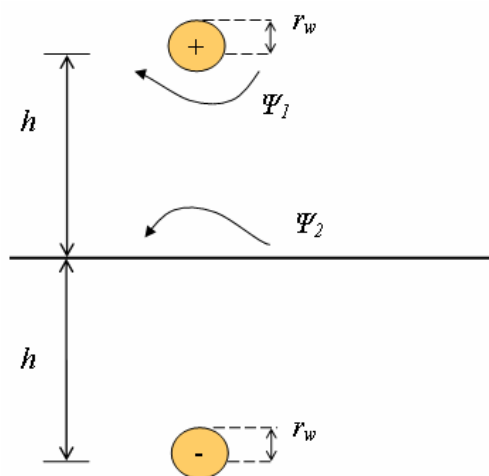


Fig. A.1. Método de las imágenes, caso monofásico.



La inductancia debida a la configuración geométrica de la línea está dad por:

$$L_G = \frac{\psi}{I} = \frac{\mu_0}{2\pi r} \ln\left(\frac{2h - r_w}{r_w}\right) \quad (\text{A.1})$$

Suponiendo que $h \gg r_w$ como es el caso de líneas aéreas se tiene:

$$L_G \approx \frac{\mu_0}{2\pi r} \ln\left(\frac{2h}{r_w}\right) \quad (\text{A.2})$$

A.2.2 Inductancia debida al retorno por tierra.

Esta inductancia es función del campo magnético producido por las corrientes remolino que se forman en el plano de tierra cuando los conductores se someten a una excitación de alta frecuencia. Se asume que las corrientes de retorno por tierra se concentran en un plano ficticio, paralelo al plano de tierra y localizado a una profundidad de penetración compleja:

$$P = \sqrt{\frac{\rho_e}{j\omega\mu_e}} \quad (\text{A.3})$$

Donde ρ_e y μ_e son la resistividad y permeabilidad del terreno, respectivamente.

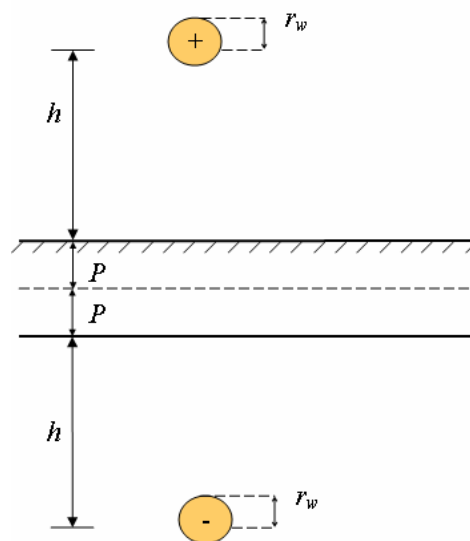


Fig. A.2. Método de las imágenes complejas, caso monofásico.



Considerando P , la inductancia se calcula como:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi r'} \ln\left(\frac{2(h+P)}{r_w}\right) \quad (\text{A.4})$$

De esta inductancia puede extraerse un término debido a la geometría de la línea (L_G) y otro debido al retorno por tierra:

$$L = L_G + L_t \quad (\text{A.5})$$

Donde:

$$L_t = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left[\frac{2(h+P)}{2h}\right] = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{P}{h}\right) \quad (\text{A.6})$$

Se observa que dado que P es compleja, L_t lo es también:

$$L_t = a + jb \quad (\text{A.7})$$

Multiplicando la ecuación anterior por $j\omega$ pueden obtenerse L_t y R_t :

$$Z_t = j\omega L_t = j\omega(a + jb) = -\omega b + j\omega a = R_t + j\omega L_t \quad (\text{A.8})$$

De donde:

$$R_t = -\omega b \quad (\text{A.9})$$

$$L_t = a \quad (\text{A.10})$$

Z_t representa la impedancia debida al retorno por tierra; su parte imaginaria L_t proporciona el coeficiente de inducción propiamente dicho y R_t representa la resistencia aparente del suelo, es decir, las pérdidas adicionales debidas a las corrientes del retorno.

Este análisis fue ideado originalmente por C. Dubanton, y se ha observado que se obtienen resultados muy similares a las series de Carson, pero de manera mucho más sencilla.





A.2.3 Capacitancia.

De igual forma que en la inductancia, para el cálculo de la capacitancia se aplica el método de las imágenes obteniéndose la siguiente expresión:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{2h}{r_w}\right)} \quad (\text{A.11})$$

De tal manera que se debe satisfacer la relación:

$$L_G C = \mu_0 \epsilon_0 \quad (\text{A.12})$$

A.2.4 Impedancia Interna del conductor.

Esta impedancia se debe al efecto skin que consiste en que la corriente que fluye en un conductor tiende a circular cerca de su superficie entre mayor sea la frecuencia.

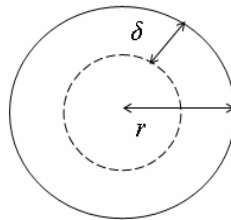


Fig. A.3. Efecto skin en un conductor.

Se define el área δ como:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho_c}{j\omega\mu_c}} \quad (\text{A.13})$$

La resistencia de corriente directa puede calcularse como:

$$R_{CD} = \frac{\rho_c}{A} = \frac{\rho_c}{\pi r^2} \quad (\text{A.14})$$

Donde ρ_c es la resistividad del conductor. La impedancia a muy altas frecuencias se calcula como:

$$Z_{hf} = \frac{\rho_c}{2\pi r \delta} \quad (\text{A.15})$$



El denominador de la ecuación anterior se calcula como el área de una dona:

$$A_d = 2\pi r \delta - \pi \delta^2 \quad (\text{A.16})$$

El segundo término del lado derecho en altas frecuencias se elimina ya que $\delta \ll r$. En general se puede emplear:

$$Z_c = \sqrt{R_{CD}^2 + Z_{hf}^2} \quad (\text{A.17})$$

La impedancia serie generalizada se define de lo anterior como:

$$Z = Z_G + Z_t + Z_c \quad (\text{A.18})$$

Por otro lado, la admitancia en derivación generalizada de la línea se define como:

$$Y = G + j\omega C \quad (\text{A.19})$$

Pero G se desprecia generalmente para líneas aéreas, entonces:

$$Y = j\omega C \quad (\text{A.20})$$

A.3 LÍNEA MULTICONDUCTORA

A.3.1 Matriz de Inductancias.

La inductancia propia del i -ésimo conductor (sin considerar inductancia interna) está dada por:

$$L_{ii} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left[\frac{2(h_i + P)}{r_i} \right] \quad (\text{A.21})$$

De forma similar a la línea monofásica:

$$L_{ii} = L_{Gii} + L_{iii} \quad (\text{A.22})$$

Mientras que de acuerdo con la Fig. A.5, L_{iii} se define como:

$$L_{iii} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{P}{h_i} \right) \quad (\text{A.23})$$



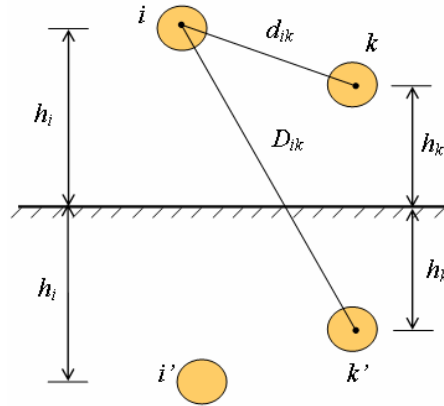


Fig. A.4. Método de imágenes caso multiconductor.

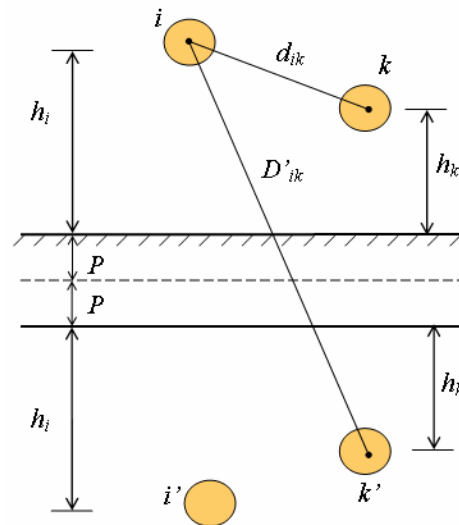


Fig. A.5. Método de imágenes compleja, caso multiconductor.

La inductancia y resistencia de retorno por tierra para el i -ésimo conductor se obtienen de manera similar a la línea monofásica:

$$L_{iii} = a_{ii} + jb_{ii} \quad (\text{A.24})$$

Multiplicando la ecuación anterior por $j\omega$ pueden obtenerse L_t y R_t :

$$Z_{iii} = j\omega L_{iii} = j\omega(a_{ii} + jb_{ii}) = -\omega b_{ii} + j\omega a_{ii} = R_{iii} + j\omega L_{iii} \quad (\text{A.25})$$

De donde:

$$R_t = -\omega b_{ii} \quad (\text{A.26})$$

$$L_t = a_{ii} \quad (\text{A.27})$$





La inductancia mutua entre los conductores i y k se calcula como:

$$L_{ik} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{D'_{ik}}{d_{ik}} \right) \quad (\text{A.28})$$

Nuevamente se tiene:

$$L_{ik} = L_{Gik} + L_{tik} \quad (\text{A.29})$$

Donde:

$$L_{Gik} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{D_{ik}}{d_{ik}} \right) \quad (\text{A.30})$$

$$L_{tik} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{D'_{ik}}{D_{ik}} \right) \quad (\text{A.31})$$

Las distancias entre conductores se definen de acuerdo con las coordenadas de los mismos.

$$D_{ik} = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (h_i + h_k)^2} \quad (\text{A.32})$$

$$d_{ik} = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (h_i - h_k)^2} \quad (\text{A.33})$$

$$D'_{ik} = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (h_i + h_k + 2P)^2} \quad (\text{A.34})$$

La matriz de impedancias completa de una línea multiconductora se calcula como:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_G + \mathbf{Z}_t + \mathbf{Z}_c \quad (\text{A.35})$$

$$\mathbf{Z} = j\omega(\mathbf{L}_G + \mathbf{L}_t) + \mathbf{R}_t + \mathbf{Z}_c \quad (\text{A.36})$$

Recordando que:

$$\mathbf{Z}_t = j\omega\mathbf{L}_t = j\omega\mathbf{L}_t + \mathbf{R}_t \quad (\text{A.37})$$

Además \mathbf{Z}_c se calcula de igual forma al caso monofásico para cada uno de los conductores.





A.3.2 Matriz de Capacitancias **C**.

Los elementos de **C** se calculan de forma análoga a **L_G**, dado que:

$$\mathbf{L}_G \mathbf{C} = \mu_0 \varepsilon_0 \mathbf{I} \quad (\text{A.38})$$

Donde **I** es la matriz identidad de $n \times n$.

Si relacionamos la carga total del i -ésimo conductor con todos los voltajes que la producen:

$$q_i = C_{i1}V_1 + C_{i2}V_2 + \dots + C_{in}V_n \quad (\text{A.39})$$

En forma matricial

$$\mathbf{Q} = \mathbf{C}\mathbf{V} \quad (\text{A.40})$$

De donde:

$$\mathbf{V} = \mathbf{P}\mathbf{Q} \quad (\text{A.41})$$

Siendo **P** la matriz de coeficientes de potencial de Maxwell, dada por $\mathbf{P} = \mathbf{C}^{-1}$.

Recordando que para la línea monofásica se tiene:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)} \quad (\text{A.42})$$

Puede definirse **P** para el i -ésimo conductor:

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \ln\left(\frac{2h_i}{r_i}\right) \quad (\text{A.43})$$

El coeficiente de potencial mutuo entre i - k es:

$$P_{ik} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \ln\left(\frac{D_{ik}}{d_{ik}}\right) \quad (\text{A.44})$$

Finalmente, la matriz de admitancias en derivación de la línea se calcula como:

$$\mathbf{Y} = j\omega\mathbf{C} = j\omega\mathbf{P}^{-1} \quad (\text{A.45})$$



**APÉNDICE
B****ARTÍCULOS PUBLICADOS**

- C. Tejada Martínez, P. Gómez Zamorano, J. C. Escamilla Sánchez, “*Análisis de la Radiointerferencia Debida al Efecto Corona en Líneas de Transmisión de Alta Tensión*”, 10º Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas, México, D.F., México, 26 al 30 de Noviembre del 2007.
- C. Tejada, P. Gómez, J. C. Escamilla, “*Cálculo de Niveles de Radiointerferencia en Líneas de Transmisión de Alta Tensión con Efecto Corona*”, aceptado para su publicación en IEEE Latin America Transactions, 2008.
- Carlos Tejada, Pablo Gómez, Fermín P. Espino-Cortés, “*Método de Cálculo y Criterios para la Atenuación de Radiointerferencia por Corona en Líneas de Transmisión*”, Vigésima Primera Reunión de Verano de Potencia y Aplicaciones Industriales RVP-AI/2008, Acapulco, Gro., México, 6 al 12 de Julio del 2008. (*Artículo Aceptado y por Publicar*).

